



Titre: Une méthode d'analyse et de minimisation du risque d'inondation
Title: appliquée à la rivière Châteauguay

Auteur: Claudine Breton
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Breton, C. (1999). Une méthode d'analyse et de minimisation du risque
Citation: d'inondation appliquée à la rivière Châteauguay [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8689/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8689/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**UNE MÉTHODE D'ANALYSE ET DE MINIMISATION DU RISQUE
D'INONDATION APPLIQUÉE À LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY**

**CLAUDINE BRETON
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
NOVEMBRE 1999**



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-48840-3

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

UNE MÉTHODE D'ANALYSE ET DE MINIMISATION DU RISQUE
D'INONDATION APPLIQUÉE À LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

Présenté par : BRETON Claudine

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ROUSSELLE Jean, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. ROBERT Benoît, Ph.D., membre

À Marc Breton...
*même si la réussite, finalement,
ce n'est pas ce qui compte vraiment...*

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord et avant tout M. Claude Marche, mon directeur de recherche, évidemment pour son excellente supervision et sa grande disponibilité, mais aussi pour m'avoir donné l'opportunité de donner un nouvel élan à ma carrière et de me réaliser pleinement durant ces deux années.

Je remercie tous mes collègues de la section hydraulique ainsi que mes professeurs pour leur support technique, le partage de leurs connaissances et leur agréable compagnie. Merci à Éric Mainville, soit assuré que ton support et ta joie de vivre quotidienne ont été fort appréciés.

Je remercie également le Fonds FCAR pour m'avoir procuré un support financier.

RÉSUMÉ

Les crues de plusieurs rivières du Québec causent à chaque année des inondations et ces événements génèrent des impacts socio-économiques importants. La fréquence et l'ampleur des inondations touchant le Québec démontrent bien que la population est exposée à un risque réel d'inondation.

Ce mémoire propose une méthode d'évaluation, d'analyse et de minimisation du risque d'inondation. L'approche présentée vise à évaluer les impacts des inondations de façon rapide et rigoureuse et à exploiter ces résultats pour la prise de décision dans le cadre de la gestion du risque d'inondation.

Le risque d'inondation est calculé en évaluant les niveaux d'eau de différents scénarios d'inondation à partir d'un modèle d'écoulement unidimensionnel non permanent, et en intégrant ces résultats à un logiciel géoréférencé de calcul des dommages d'inondation. L'analyse du risque calculé permet d'identifier l'existence d'un risque considéré inacceptable selon des critères établis. Pour chaque site où des interventions sont justifiées, des scénarios de minimisation du risque tenant compte des mécanismes d'inondation sont élaborés et ensuite simulés afin d'en mesurer l'efficacité.

La démarche a été appliquée à l'étude de dix sites du bassin de la rivière Châteauguay. La simulation des divers scénarios de minimisation du risque sur ces sites a démontré qu'il était possible de réduire les impacts des inondations par des interventions appropriées.

La méthode d'analyse et de minimisation du risque proposée peut s'adapter à l'étude de tout autre cours d'eau, car elle tient compte des conditions hydrologiques et hydrauliques locales. Les outils de simulation utilisés offrent

également la possibilité de servir au développement optimal à long terme des plaines inondables, à la prévision à court terme et au suivi en temps réel des inondations.

ABSTRACT

Every year several rivers in Quebec are responsible for severe flooding and these events generate major socio-economic impacts. The frequency and magnitude of these episodes highlight the existence of a real flood risk.

A methodology to evaluate, analyse and minimise the risk of flooding is proposed. The approach presented targets a quick and rigorous evaluation of the flood impacts and exploits the results to facilitate decision making relative to the management of the flood risks.

The flood risk is calculated by evaluating water levels associated with various flood discharge scenarios using a one-dimensional unsteady flow model, and by incorporating these results in a geo-referenced software that calculates the flood damage. The analysis of the calculated risk allows the identification of risks that are judged unacceptable compared to established criteria. Scenarios of risk minimisation are elaborated based on flooding mechanisms and then simulated to measure their efficiency.

This approach has been applied to the study of ten sites along the Châteauguay River. The proposed analysis and risk minimisation method may be applied to any watercourse as it takes into account the local hydrological and hydraulic conditions.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES.....	xv
 INTRODUCTION.....	 1
 CHAPITRE 1: ÉTAT DE LA CONNAISSANCE.....	 3
1.1 Le risque d'inondation	3
1.2 Évaluation des dommages dus aux inondations.....	4
1.2.1 L'évolution du risque d'inondation	5
1.2.2 La nature des dommages.....	5
1.2.3 Les modèles hydroéconomiques.....	7
1.2.4 Approches pour le calcul du risque d'inondation	8
1.2.5 Relation entre la profondeur et les dommages.....	9
1.2.6 Les derniers développements	10
1.2.7 Discussion sur la précision des méthodes d'estimation des dommages	12
1.3 Modélisation des écoulements en rivière.....	13
1.4 Méthodes de réduction des impacts des inondations	15
1.4.1 Mesures structurelles et non structurelles	15
1.4.2 Description des mesures	16
1.4.2.1 Le contrôle des inondations par réservoirs	17
1.4.2.2 Les digues et les murs de protection	18

1.4.2.3	La modification du lit du cours d'eau	18
1.4.2.4	Évacuation de la population.....	19
1.5	Effet des couverts de glace et embâcles sur les inondations	19
1.5.1	La problématique.....	19
1.5.2	L'effet de la présence de glace.....	20
1.5.3	Le processus de formation du couvert de glace et des embâcles ...	21
1.5.4	Les facteurs influençant la formation d'embâcles.....	22
1.5.5	La résistance à l'écoulement d'un couvert de glace	23
1.6	Résumé	25

CHAPITRE 2: MÉTHODE POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE ET SA

MINIMISATION	27
2.1 Première étape : la distribution de probabilité des crues	27
2.2 Deuxième étape : simulations hydrauliques	28
2.3 Troisième étape : estimation des dommages	29
2.4 Quatrième étape : calcul du risque d'inondation.....	31
2.5 Cinquième étape : analyse du risque	31
2.6 Sixième étape : minimisation du risque	32

CHAPITRE 3: CALCUL DU RISQUE D'INONDATION SUR LA RIVIÈRE

CHÂTEAUGUAY	33
3.1 Description du territoire retenu pour l'étude.....	33
3.1.1 Aspect géographique	33
3.1.2 Les inondations	36
3.2 Données hydrologiques	37
3.2.1 Stations de mesure des débits sur le bassin	37
3.2.2 Analyse de fréquence.....	38
3.2.3 Choix des crues pour l'analyse.....	40
3.2.4 Probabilités associées à chaque événement	40

3.3 Simulations hydrauliques avec le logiciel DAMBRK	41
3.3.1 Débits	41
3.3.2 Sections d'écoulement	42
3.3.3 Sections de contrôle	43
3.3.4 Calibration	46
3.4 Estimation des dommages avec le logiciel DOMINO	47
3.4.1 Choix des sites	47
3.4.2 Position et valeur des bâtiments	49
3.4.3 Critères d'estimation des impacts	50
3.4.3.1 Pertes aux bâtiments	51
3.4.3.2 Pertes au contenu	52
3.4.3.3 Pertes de vies potentielles	52
3.4.4 Évaluation des dommages sur les sites	53
3.5 Le risque d'inondation estimé	54

CHAPITRE 4: ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION SUR LA RIVIÈRE

CHÂTEAUGUAY	59
4.1 Introduction	59
4.2 Notion de risque acceptable	59
4.3 Analyse des impacts et du risque non acceptable	61
4.3.1 Risque de pertes économiques	61
4.3.2 Pertes de vies potentielles	62
4.3.3 Dommages indirects	62
4.4 Interventions rentables et bénéfices possibles	64
4.5 Facteurs influençant le risque estimé	65
4.5.1 Facteurs d'incertitude	65
4.5.2 Représentativité des sites	67
4.5.3 Propriétés individuelles	70

CHAPITRE 5: MINIMISATION DES IMPACTS SUR LA RIVIÈRE

CHÂTEAUGUAY	71
5.1 Inventaire des moyens d'intervention	71
5.2 Critères d'intervention sur la rivière Châteauguay	73
5.2.1 Les types de critères	73
5.2.2 Les pertes économiques	73
5.2.3 La réglementation.....	75
5.2.4 Les dommages indirects.....	76
5.2.6 Résumé des critères de justification des interventions	77
5.3 Identification des sites pour la réduction des impacts.....	78
5.4 Mécanismes d'inondation et interventions proposées	80
5.4.1 Site 2	80
5.4.1.1 Mécanismes d'inondation	80
5.4.1.2 Interventions proposées	84
5.4.2 Site 3	85
5.4.2.1 Mécanismes d'inondation	85
5.4.2.2 Interventions proposées	88
5.4.3 Site 5	91
5.4.3.1 Mécanismes d'inondation	91
5.4.3.2 Interventions proposées	94
5.4.4 Site 8	95
5.4.4.1 Mécanismes d'inondation	95
5.4.4.2 Interventions proposées	97
5.5 Simulation des interventions et évaluation des bénéfices	97
5.5.1 Synthèse des interventions à simuler.....	97
5.5.2 Dérivation du débit par la décharge Schyler.....	98
5.5.3 Modification du seuil du barrage de Huntingdon	99
5.5.4 Construction de murs au site 3.....	100
5.5.5 Efficacité des interventions à Huntingdon.....	101

5.5.6 Protection des bâtiments aux sites 5 et 8	103
5.6 Impacts négatifs potentiels	103
CHAPITRE 6: IMPACTS D'UN COUVERT DE GLACE	105
6.1 Effet d'un couvert de glace	105
6.2 Équation modifiant le coefficient de résistance	105
6.3 Hypothèses et sources d'erreurs	106
6.4 Couverts de glace sur la rivière Châteauguay	107
6.5 Simulation d'une inondation avec couvert de glace	109
CONCLUSION	111
RÉFÉRENCES	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Stations hydrométriques de la rivière Châteauguay	38
Tableau 3.2 : Probabilités associées aux crues	41
Tableau 3.3 : Répartition des apports en m ³ /s des sous-bassins de la rivière Châteauguay.....	43
Tableau 3.4 : Relations débit / niveau des sections de contrôle.....	45
Tableau 3.5 : Caractéristiques des sites et cartographie disponible	48
Tableau 3.6 : Nombre de bâtiments, densité et répartition des unités par site..	50
Tableau 3.7 : Impacts des inondations sur la rivière Châteauguay	53
Tableau 4.1 : Risque économique non acceptable	61
Tableau 4.2 : Pertes de vies potentielles.....	62
Tableau 4.3 : Proportion des dommages fréquents	64
Tableau 5.1 : Risque selon les critères de justification des interventions.....	79
Tableau 5.2 : Dommages et risque après dérivation par la décharge Schyler ..	99
Tableau 5.3 : Dommages et risque après la modification du barrage	100
Tableau 5.4 : Impacts des interventions à Huntingdon	102
Tableau 6.1 : Date des débits journaliers maximums annuels	109

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma de fonctionnement du logiciel DOMINO	30
Figure 3.1 : Bassin versant de la rivière Châteauguay	34
Figure 3.2 : Municipalités traversées par la rivière Châteauguay	36
Figure 3.3 : Distribution de fréquence des crues (stations 030901 et 030905) .	39
Figure 3.4 : Localisation des sites d'étude	47
Figure 3.5 : Risque global d'inondation sur chaque site	55
Figure 3.6 : Risque associé à chaque crue en fonction de la période de retour	57
Figure 3.7 : Risque cumulé en fonction de la période de retour des crues.....	58
Figure 5.1 : Plan de la région de Huntingdon	82
Figure 5.2 : Inondation par la crue de 20 ans au site 2	83
Figure 5.3 : Inondation par la crue de 100 ans au site 2	83
Figure 5.4 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 2	84
Figure 5.5 : Inondation par la crue de 3 ans au site 3	86
Figure 5.6 : Inondation par la crue de 20 ans au site 3	87
Figure 5.7 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 3	87
Figure 5.8 : Plan de la région de la ville d'Ormstown	91
Figure 5.9 : Inondation par la crue de 20 ans au site 5	92
Figure 5.10 : Inondation par la crue de 100 ans au site 5	93
Figure 5.11 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 5	93
Figure 5.12 : Inondation par la crue de 20 ans au site 8	96
Figure 5.13 : Inondation par la crue de 100 ans au site 8	96
Figure 5.14 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 8	97

INTRODUCTION

Les crues de plusieurs rivières du Québec causent à chaque année des inondations et ces événements génèrent des impacts socio-économiques importants. Par exemple, pensons aux conséquences des inondations du Saguenay en 1996, de la crue printanière de la rivière Châteauguay en 1998 ou encore des débordements printaniers de la rivière Chaudière dans la Beauce. La fréquence et l'ampleur des inondations touchant le Québec démontrent bien que la population est exposée à un risque réel d'inondation.

Cependant, pour effectuer une meilleure gestion des plaines inondables et un meilleur contrôle des inondations, la population et les autorités concernées doivent connaître le niveau de risque et les impacts potentiels contre lesquels elles veulent se prémunir. La quantification du risque et l'étude de sa répartition géographique peut permettre de mieux juger de la situation, d'évaluer les pertes économiques et d'établir de façon optimale des scénarios d'intervention et de mesures d'urgence afin de minimiser les impacts des inondations.

Dans cet objectif, ce mémoire propose une méthode d'évaluation, d'analyse et de minimisation du risque d'inondation. L'approche présentée vise à évaluer le risque d'inondation de façon rapide et rigoureuse et à exploiter ces résultats pour la prise de décision dans le cadre de la gestion des inondations et de la minimisation du risque. Ces travaux font partie d'un projet s'étalant sur trois ans visant à développer une méthodologie d'analyse, de prévision et de contrôle des risques d'inondation au Québec. Ce projet est réalisé conjointement par l'École Polytechnique de Montréal et l'École de Technologie Supérieure et est subventionné par le Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la

recherche (FCAR). L'évaluation du risque est réalisée à l'aide du logiciel DOMINO, un logiciel développé par des chercheurs de l'École Polytechnique de Montréal pour Hydro-Québec.

Le mémoire se divise en six chapitres. Le chapitre 1 contient les résultats d'une revue de littérature portant sur les principaux aspects touchés par cette étude, soit la définition du risque, l'évaluation des dommages dus aux inondations, la modélisation des écoulements en rivière, les méthodes de minimisation des impacts des inondations et l'effet des glaces sur les inondations. Le chapitre 2 présente la méthodologie et les outils employés pour effectuer l'évaluation, l'analyse et la minimisation du risque. Le chapitre 3 contient un exemple de calcul du risque d'inondation appliqué à la rivière Châteauguay. Au chapitre 4, le risque évalué est analysé en fonction des objectifs de minimisation des impacts. Le chapitre 5 propose une stratégie pour la prise de décisions concernant la minimisation des impacts et des interventions pour diminuer le risque sur la rivière Châteauguay. Le chapitre 6 traite de l'impact d'un couvert de glace sur les inondations. Finalement, une conclusion présente un portrait général de la méthode et propose de nouvelles voies de développement.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE LA CONNAISSANCE

1.1 *Le risque d'inondation*

Le terme de risque étant très largement utilisé dans plusieurs contextes différents, il importe de préciser la définition qui lui a été attribuée dans cette étude.

La définition adoptée est celle figurant dans la norme canadienne sur l'analyse de risque (CSA, 1991). Cette définition est également utilisée par Bouillon et al. (1999), dans le cadre de l'étude de l'évolution du risque d'inondation sur la rivière Châteauguay, et par Awadallah et al. (1999), pour l'étude de l'évolution du risque hydrologique sur la rivière Châteauguay. Cette définition s'énonce comme suit.

Le risque est une mesure de la probabilité et de la sévérité d'un effet défavorable pour la santé, pour les biens ou pour l'environnement. Le risque est souvent estimé par l'espérance mathématique des conséquences de l'occurrence d'un événement défavorable sur une période de temps déterminée (risque = probabilité x conséquences). Néanmoins, une interprétation plus globale du risque incorpore la probabilité et les conséquences sous une forme non multipliée.

Le présent document vise plus spécifiquement l'étude du risque d'inondation. Le risque d'inondation est le produit d'une probabilité, soit le risque hydrologique, et des conséquences associées, soit les dommages. De façon plus précise, Awadallah et al. (1999) proposent les définitions suivantes du risque hydrologique et du risque d'inondation.

Le risque hydrologique est la probabilité d'occurrence d'une crue d'amplitude donnée. Le risque est égal à $1/T$, où T est la période de récurrence (ou de retour) de la crue.

Le risque d'inondation est la probabilité d'occurrence qu'un territoire donné soit inondé, pondérée par les dommages induits. Le risque d'inondation peut être mesuré en termes monétaires, en nombre de bâtiments endommagés, etc.

James et Hall (1986) mettent en évidence l'importance d'estimer et d'étudier le risque et de communiquer cette information afin de mieux gérer les plaines inondables. Ils affirment que l'efficacité d'un programme de réduction du risque d'inondation dépend de l'efficacité avec laquelle l'information sur le risque est transmise à la population. L'emploi d'un dénominateur commun permet une meilleure communication entre les différents intervenants, soit les experts, les autorités gouvernementales et les occupants des plaines inondables. L'utilisation d'un terme quantitatif aura l'avantage de tirer de l'analyse de risque des résultats pouvant être aisément utilisés pour la prise de décision. Les pertes économiques potentielles annuelles moyennes, exprimées en dollars par année, constitue l'expression quantitative jugée la plus adéquate par James et Hall. Ce terme est un synonyme du risque d'inondation, lorsque les dommages induits sont évalués en dollars.

1.2 Évaluation des dommages dus aux inondations

Les méthodes d'évaluation des dommages dus aux inondations ont fait l'objet de plusieurs études au cours des dernières décennies. Ces méthodes développées visaient principalement à obtenir les données économiques de base pour fixer des primes d'assurance ou pour analyser la rentabilité de projets en relation avec les crues et les inondations.

Les pertes économiques sont un critère majeur justifiant les investissements dans la réduction des impacts des inondations. Une analyse de rentabilité s'impose avant la mise sur pied de projets pour le contrôle des crues, autant dans la considération de solutions structurelles que non structurelles. Les diverses méthodes d'évaluation des dommages présentées dans la littérature ont porté sur les inondations résultant de crues naturelles, de crues synthétiques (bris d'ouvrages de retenue) ou d'une combinaison des deux.

1.2.1 L'évolution du risque d'inondation

Tel que mentionné par El-Jabi et Rousselle (1987), les pertes dues aux inondations augmentent avec les années, malgré les efforts consacrés à réduire le risque. Ils expliquent cet accroissement des dommages par les observations suivantes :

- l'accroissement de la valeur des propriétés et de l'activité économique dans les plaines inondables;
- l'accroissement de la densité de population et de l'utilisation du territoire dans les plaines inondables;
- la tendance de la population à surestimer le degré de protection offert par les ouvrages de contrôle des inondations;
- le manque de données sur les débits et sur les dommages potentiels;
- la variabilité des caractéristiques hydrologiques des crues.

1.2.2 La nature des dommages

Dans la littérature sont exposées différentes approches pour estimer les dommages dus aux inondations et le risque d'inondation (Appelbaum, 1985;

Boyle et al., 1998; Das et Lee, 1988; Grigg et Helweg, 1975; McBean et al., 1988a). Cependant, d'un auteur à l'autre, la nature des dommages considérés varie. De façon arbitraire, Grigg et Helweg (1975), dans leur article faisant la synthèse des règles de l'art en matière d'estimation des dommages, ont établi cinq catégories de dommages : les dommages directs, indirects, secondaires, intangibles, et ceux liés à l'incertitude. Les dommages directs surviennent aux bâtiments et à leur contenu, ainsi qu'aux infrastructures qui sont mis en contact direct avec l'eau lors de la crue. Les dommages indirects incluent tous les inconvénients causés dans la zone inondée, dont la fermeture de commerces, la déviation de la circulation et les délais. Les dommages secondaires regroupent les pertes occasionnées à l'extérieur du territoire inondé. Les dommages intangibles englobent toutes les pertes difficilement évaluables ou moins perceptibles, par exemple la dégradation de la qualité de l'environnement, l'esthétique et le bien-être de la population. Finalement, les dommages liés à l'incertitude se traduisent par les dépenses qui seront faites dans le but de prévenir des pertes, par exemple l'achat de polices d'assurances. Arnell (1986) souligne que les dommages directs étant les plus visibles et les plus faciles à évaluer, ils sont souvent les seuls à être considérés.

Généralement, l'analyse économique d'un projet se fait par une comparaison des coûts et des bénéfices. Plusieurs auteurs (Appelbaum, 1985; Arnell, 1986; Boyle et al., 1998; Johnson, 1985) ont choisi d'exprimer en valeur monétaire et sur une base annuelle les dommages potentiellement causés par une crue naturelle. L'expression des dommages en termes de dommages potentiels annuels moyens permet de déduire directement les coûts occasionnés annuellement par les inondations et de calculer les bénéfices annuels d'une intervention. Beard (1997) décrit la méthode de calcul des dommages potentiels annuels moyens : la courbe de distribution de fréquence de crues est divisée en intervalles de fréquence, et chaque intervalle est multiplié par les

dommages moyens causés par les crues comprises dans l'intervalle. La somme de ces produits est le montant des dommages potentiels annuels, lorsque les fréquences sont exprimées en événements par année ou en probabilité annuelle allant de 0,0 à 1,0. Awadallah et al. (1999) et Bouillon et al. (1999) utilisent le terme « risque d'inondation » pour désigner les dommages potentiels annuels moyens.

Les analyses économiques portant sur les crues synthétiques, en particulier dues aux ruptures de barrages, utilisent des bases différentes pour effectuer la comparaison des coûts et des bénéfices.

1.2.3 Les modèles hydroéconomiques

El-Jabi et Rousselle (1987) ont formulé un modèle hydroéconomique probabiliste pour l'évaluation des dommages dus aux inondations. Il permet de réaliser une analyse des coûts et bénéfices de la gestion des plaines inondables en intégrant les données hydrologiques, hydrodynamiques, physiques et économiques. Le modèle développé permet d'estimer les dommages causés par des crues futures en faisant des projections du développement d'une région donnée. Les auteurs ont appliqué le modèle théorique à la gestion d'un tronçon de la rivière Richelieu, au Québec.

Ouellette et al. (1988) utilisent la même approche hydroéconomique pour le calcul des dommages et présentent une méthodologie pour évaluer les bénéfices des programmes de gestion des plaines inondables.

1.2.4 Approches pour le calcul du risque d'inondation

De façon générale, on distingue deux approches pour l'estimation du risque d'inondation attribuable aux crues naturelles: par l'utilisation exclusive de données historiques ou par l'utilisation de relations fréquence / dommages.

La première approche, la plus directe, consiste à estimer les dommages annuels moyens en se basant sur une série de données historiques. Ces données compilent les dommages causés annuellement par les inondations sur plusieurs années, pour le site à l'étude. Toutefois, comme mentionné par Arnell (1986), cette méthode ne peut être mise en application, étant donné que de telles données ne sont généralement pas disponibles et ne couvriraient qu'un nombre d'années très limité.

La seconde approche fait appel à l'utilisation de fonctions reliant le montant des dommages à la fréquence d'occurrence de la crue causant ces mêmes dommages (relation fréquence / dommages). Cette relation est obtenue en combinant la relation entre la fréquence à laquelle survient une crue et le niveau d'eau correspondant (relation fréquence / profondeur) et la relation entre le niveau d'eau et les dommages causés (relation profondeur / dommages)

Cette seconde approche semble avoir été adoptée par la plupart des auteurs cherchant à estimer les dommages potentiels moyens annuels, ou risque d'inondation, dont Appelbaum (1985), Bouillon et al. (1999), Boyle et al. (1998), Das et Lee (1988) et El-Jabi et Rousselle (1987).

1.2.5 Relation entre la profondeur et les dommages

La relation entre la profondeur et les dommages permet de connaître la variation des dommages causés à une structure, à un groupe de structures ou à leur contenu en fonction de la profondeur d'eau locale. Les dommages sont exprimés en coûts ou bien en pourcentage de la valeur totale des structures. La relation profondeur / dommages peut être établie de quatre façons.

La première consiste à déduire la relation profondeur / dommages de chaque bâtiment à partir de données recueillies suite à une inondation étant survenue au même endroit. McBean (1988a) énumère certaines lacunes de la compilation de ces données, dont la difficulté de recueillir toute l'information nécessaire à une étude détaillée subséquente, l'omission de certains types de dommages, le nombre restreint de biens endommagés considérés et des formats différents de rapport des dommages.

La seconde consiste à établir une relation profondeur / dommages pour chaque bâtiment à partir de ses caractéristiques propres. Cette méthode requiert une enquête sur les caractéristiques de chaque structure et de son contenu, donc une cueillette de données laborieuse.

La troisième façon consiste à utiliser des courbes reliant la profondeur et le coût des dommages pour un certain nombre de types de structures présentant des caractéristiques communes. McBean (1988a, b) a développé une série de courbes, pour des résidences, à partir des résultats d'une enquête. Les catégories de résidences ont été établies selon des caractéristiques précises, dont le nombre d'étages, la présence d'un sous-sol aménagé ou la nature du revêtement extérieur. L'utilisation de ces courbes implique donc qu'il faut

recueillir sur chaque structure de la plaine inondable un nombre limité de données afin d'en déterminer le type.

La quatrième façon fait appel à des courbes reliant la profondeur et le pourcentage de perte de la valeur totale d'un type bâtiment et de son contenu. L'établissement des dommages requiert donc une estimation de la valeur totale de chaque bâtiment. Aux États-Unis, le Fédéral Insurance Administration (FIA) a élaboré, en 1974, des courbes profondeur / pourcentage de dommages basées sur des réclamations d'assurance recueillies suite à des événements d'inondation. Ces courbes ont été employées par Appelbaum (1985) et Das et Lee (1988). Marche et McNeil (1993) ont également adopté cette approche en utilisant des facteurs de pondération des dommages en fonction de la profondeur et de la vitesse d'écoulement.

1.2.6 Les derniers développements

Les développements des méthodes d'estimation des dommages reliant fréquence, niveau d'eau et dommages ont visé à rendre l'estimation du risque d'inondation moins laborieuse par diverses estimations ou par l'utilisation de données provenant de sources existantes. Ces développements ont permis de limiter les efforts requis par la cueillette de données de base et de réduire le temps et les ressources nécessaires à l'estimation des dommages et du risque d'inondation. L'utilisation d'outils informatiques a permis d'élaborer des méthodes automatisées d'estimation des dommages (Bouillon et al., 1999; Boyle et al., 1998; Das et Lee, 1988; Marche et McNeil, 1993). Ces méthodes permettent un accès rapide à l'information de base nécessaire, ainsi qu'un traitement et un calcul des dommages accélérés. Le processus d'estimation des dommages se trouve alors simplifié et peut permettre cas une plus grande

précision étant donnée la possibilité de considérer une plus grande quantité d'informations.

Das et Lee (1988) calculent les dommages potentiellement occasionnés par les crues extrêmes en utilisant des données économiques de base provenant de sources existantes. Également, ils simplifient l'association du niveau d'eau de la rivière avec la profondeur de submersion des structures en estimant des profondeurs moyennes. La zone urbaine située dans la plaine inondable est divisée en blocs ou quartiers, et chaque bloc est ensuite considéré comme une unité de terrain plat et possédant une élévation moyenne. Les dommages sont estimés à partir des courbes profondeur / dommages, les bâtiments d'un bloc étant considérés tous à la même élévation. Cette méthode limite le nombre de données à recueillir sur le terrain. Toutefois, l'utilisation d'élévations et de profondeurs moyennes réduit la précision des estimations.

Boyle et al. (1998) utilisent les systèmes d'information géographique pour étudier les impacts des inondations. Leur méthodologie fait appel à l'utilisation de relations fréquence / profondeur et profondeur / dommages. La cueillette et la compilation des données sont réalisées à l'intérieur d'un système informatisé. La numérisation de cartes permet de recueillir des données spatiales sur les cours d'eau, les routes, les limites de lots, les édifices et les courbes de niveau du terrain. Le profil bathymétrique du cours d'eau, des données sur l'utilisation du territoire et les rôles d'évaluation sont également ajoutés aux données. Les relations fréquence / profondeur sont obtenues par des simulations hydrauliques avec le modèle hydraulique HEC-2 et incorporées aux données. Un modèle numérique de la topographie du terrain est calculé, et les zones affectées par l'inondation sont déterminées en y superposant le plan d'eau. Ainsi, les structures contenues dans la zone submergée peuvent être identifiées

rapidement. La profondeur moyenne d'eau est calculée pour chaque propriété et les dommages sont estimés à partir de courbes profondeur / dommages.

Bouillon et al. (1999) utilisent le logiciel DOMINO, développé pour Hydro-Québec (Gagnon et al., 1998; SOBEK TECHNOLOGIES Inc., 1998), pour effectuer le calcul des dommages dus aux inondations. Ce logiciel permet de constituer un modèle numérique du terrain, de calculer les zones inondées pour différents scénarios d'inondation et d'en calculer les impacts. L'utilisation d'un modèle d'écoulement non permanent, le modèle DAMBRK (Fread, 1984), permet de suivre dans le temps la progression des zones d'inondation et des dommages. Les impacts sont évalués à partir de données extraites des rôles d'évaluation, et en tenant compte de la sévérité des conditions d'inondation locales (profondeur et vitesse d'écoulement).

1.2.7 Discussion sur la précision des méthodes d'estimation des dommages

L'introduction d'outils informatiques réduit considérablement le temps et les ressources nécessaires à la compilation des données de base. Les systèmes informatisés permettent de considérer un plus grand nombre de données, de calculer les résultats rapidement et de les présenter sous la forme désirée. Cependant ces méthodes automatisées sont basées sur les mêmes hypothèses que les méthodes manuelles, et comportent encore un certain nombre d'approximations.

D'abord, tel que discuté par Arnell (1989), il reste difficile d'estimer la fréquence d'occurrence d'une crue et l'erreur sur celle-ci, ainsi que les relations entre la profondeur et les dommages. Ensuite, tel que discuté par McBean (1998a,b) l'établissement des relations entre la profondeur de submersion et les

dommages comporte l'hypothèse que toutes les variables autres que la profondeur d'eau sont constantes. Ainsi l'influence de plusieurs facteurs tels que les délais d'avertissement, la présence de glace, la durée de l'inondation et les vitesses d'écoulement, est négligée ou mal évaluée. De plus, comme mentionné par Boyle et al. (1998), lors de l'application des relations profondeur / dommages pour des structures types, il est parfois difficile d'associer certaines structures à l'une ou l'autre des catégories de structures déterminées ou bien de connaître l'élévation à laquelle l'eau entre dans chaque propriété. Également, il est difficile d'obtenir une bonne estimation de la valeur des structures. Tel que discuté par Appelbaum (1985), dans le cas des bâtiments, l'utilisation de la valeur sur le marché nécessite l'évaluation par un agent immobilier, ce qui serait très coûteux. Les valeurs du rôle d'évaluation sont rarement à jour et sous-estiment souvent la valeur au marché. Appelbaum (1985) considère la valeur de remplacement des biens endommagés comme étant la meilleure estimation. Mais l'évaluation de la valeur de remplacement de chaque structure est longue et coûteuse.

1.3 Modélisation des écoulements en rivière

La modélisation des écoulements en rivière permet de prédire les changements de l'amplitude, de la vitesse et de la forme d'une onde de crue en fonction du temps en un ou plusieurs points le long d'un cours d'eau.

L'étude des risques d'inondation requiert la simulation hydraulique d'événements de crues, afin d'établir les niveaux d'eau correspondants qui serviront à établir les zones inondées et à calculer les impacts.

Malgré que les écoulements dans un canal non prismatique soient tridimensionnels, leur analyse est simplifiée en considérant des écoulements en une ou deux dimensions. L'analyse unidimensionnelle est plus couramment employée pour la modélisation d'écoulements en rivière. Les simulations bi-dimensionnelles, plus complexes, sont préférables lorsque le cours d'eau présente des variations de section très importantes ou en présence d'un lac.

Les équations de base servant à décrire l'écoulement unidimensionnel sont les équations de la conservation de la masse et de la conservation de la quantité de mouvement, et sont désignées comme étant les équations de St-Venant. Les équations complètes de St-Venant permettent de calculer le débit et la profondeur d'écoulement en fonction du temps et de l'espace. La dérivation de ces équations utilise les hypothèses suivantes : la vitesse d'écoulement est uniforme sur toute la section transversale, la distribution de la pression est hydrostatique, la pente du fond du canal est faible, le canal est prismatique et les pertes de charge peuvent être simulées par l'équation de Manning (Chaudhry, 1993). Certaines simplifications de la formulation de St-Venant permettent d'obtenir des équations plus faciles à résoudre (par exemple l'équation de l'onde cinématique et l'équation de l'onde diffusive). Les équations de St-Venant peuvent être résolues par des méthodes numériques (la méthode des caractéristiques, la méthode explicite et la méthode implicite). L'approche la plus employée pour la résolution de ces équations est l'approche par différences finies.

Il existe plusieurs modèles de simulation hydraulique basés sur les équations de St-Venant, complètes (les modèles dynamiques, pouvant simuler les écoulements non permanents) ou simplifiées (permettant de simuler des écoulements permanents). Par exemple, les modèles DAMBRK (Fread, 1984) et Flood Wave sont des modèles dynamiques, basés sur les équations

complètes de St-Venant. Ils simulent des écoulements à surface libre non permanents et unidimensionnels. Le modèle HEC-2 permet de calculer des profils d'écoulement permanent (Maidment, 1992).

1.4 Méthodes de réduction des impacts des inondations

1.4.1 Mesures structurelles et non structurelles

Une inondation est définie comme étant le résultat d'une quantité d'eau, provenant de précipitations ou de la fonte de neige, trop importante pour être confinée dans le lit des cours d'eau. Malgré qu'il soit difficile, voire impossible, de prévenir des inondations majeures, il demeure possible d'en minimiser les impacts dans les plaines inondables.

Thampapillai et Musgrave (1985) présentent une revue des mesures de prévention des dommages ainsi que des cadres décisionnels pour l'application de ces mesures. Ils distinguent deux types de mesures de réduction des dommages, soit les mesures structurelles et les mesures non structurelles.

Les mesures structurelles agissent sur le cours d'eau et ont pour effet de réduire la sévérité et la fréquence des inondations. Cependant Thampapillai et Musgrave (1985) dénotent deux faiblesses des mesures structurelles : d'abord, ces mesures ne fournissent jamais une protection complète contre les inondations. Elles peuvent réduire le risque de façon considérable, mais il demeure toujours un risque résiduel. Ensuite, les mesures structurelles fournissent un faux sentiment de sécurité aux occupants des plaines inondables. L'implantation de mesures structurelles peut être suivie par un développement extensif de la plaine protégée, et ainsi contribuer à augmenter le

risque. Ce phénomène met en évidence le besoin d'ajouter des mesures non structurelles, les mesures structurelles ne suffisant pas à mener au développement optimal des plaines inondables.

Les mesures non structurelles englobent les mesures suivantes: la gestion des plaines inondables, les assurances, les systèmes d'alerte et l'imperméabilisation des propriétés individuelles.

1.4.2 Description des mesures

Les méthodes de minimisation des impacts les plus courantes, identifiées par Linsley et al. (1992) sont les suivantes :

- diminution de la pointe maximale de la crue par des réservoirs;
- confinement de l'écoulement à l'intérieur de canaux préétablis par l'usage de digues, de murs ou de conduites fermées;
- réduction de l'élévation maximale du plan d'eau par l'augmentation des vitesses d'écoulement, suite à la modification du lit du cours d'eau;
- dérivation des eaux dans un canal, lequel peut retourner les eaux au même cours d'eau, plus en aval, ou les détourner vers un autre bassin versant;
- protection individuelle des propriétés contre les inondations;
- réduction du ruissellement par la gestion des terres et du territoire;
- évacuation temporairement des zones menacées d'inondation par des alertes;
- gestion des plaines inondables.

Les paragraphes suivants expliquent certaines de ces méthodes selon les descriptions faites par Linsley et al. (1992).

1.4.2.1 Le contrôle des inondations par réservoirs

Linsley et al. (1992) séparent les réservoirs en deux catégories, selon leur mode d'action et le type de contrôle qui s'exerce à la sortie. Les réservoirs d'accumulation sont gérés par l'utilisation de vannes et les réservoirs de retardement possèdent une structure de sortie fixe, déversant un débit qui est fonction du volume accumulé. La fonction de ces réservoirs est de réduire l'amplitude de la pointe d'une crue à un endroit donné en accumulant un certain volume en amont. Idéalement, le réservoir sera situé immédiatement en amont du site à protéger, et sera opéré de façon à évacuer tout le débit entrant jusqu'à ce que ce débit atteigne la capacité maximale du cours d'eau. À ce moment le réservoir devra retenir le débit excédant cette valeur maximale, et le relâcher une fois que le débit entrant aura baissé sous cette valeur. Le profil du terrain, l'occupation du territoire et les contraintes économiques peuvent cependant exiger que le réservoir soit situé plus en amont ou même l'utilisation d'une série de plus petits réservoirs. L'efficacité du contrôle exercé sur la crue dépendra de la proportion du bassin de drainage contrôlé par les réservoirs. Il est nécessaire de s'assurer que les réservoirs ne contribueront pas à augmenter l'amplitude maximale de la crue en synchronisant les apports, ce qui est plus susceptible de se produire sur un grand bassin versant. Toujours selon Linsley et al. (1992), les réservoirs d'accumulation seraient plus adéquats pour les bassins de drainage étendus, alors que les bassins de retardement seraient préférables pour les bassins plus restreints, comme en zones urbaines.

1.4.2.2 *Les digues et les murs de protection*

Les digues et murs de protection sont construits, de façon générale, parallèlement au cours d'eau. Les digues sont habituellement faites des matériaux disponibles sur place, remaniés et compactés. Souvent, ces matériaux sont de piètre qualité. La mauvaise qualité des matériaux est habituellement compensée en construisant des digues dont les pentes des parois sont faibles. La mise en place de digues requiert donc un espace disponible considérable. Cette contrainte peut occasionner des coûts importants en milieu urbain, où l'espace disponible est limité et où les coûts d'acquisition des terrains peuvent être élevés. Dans certains cas, il devient donc économiquement plus avantageux d'opter pour la construction de murs de béton. La mise en place de murs ou de digues a souvent pour effet de hausser le niveau des eaux atteint pour un débit donné, étant donné qu'ils restreignent la section d'écoulement. De plus, la construction de ces ouvrages peut avoir un impact sur le niveau d'inondation atteint sur d'autres tronçons du cours d'eau. Finalement, aucun ouvrage ne devrait être considéré comme étant indestructible car les mécanismes de rupture sont nombreux et ces ouvrages sont particulièrement vulnérables lorsque submergés.

1.4.2.3 *La modification du lit du cours d'eau*

Le niveau d'eau atteint à un endroit spécifique peut être réduit en améliorant la capacité hydraulique du cours d'eau. Différentes interventions peuvent y contribuer, par exemple l'élimination des broussailles et d'autres obstacles, le dragage ou l'élimination de méandres. Ces interventions permettent d'abaisser le niveau d'eau en diminuant la résistance à l'écoulement, en augmentant le rayon hydraulique ou en augmentant la pente du canal dans le cas de l'élimination des méandres. Il faut cependant prendre soin de ne pas rendre le

cours d'eau susceptible à l'érosion. Linsley (1992) soulignent que ces mesures, tout comme la construction de digues, sont des mesures de protection locales et peuvent avoir pour conséquence d'augmenter l'amplitude des inondations en aval. Elles doivent donc être inscrites dans un plan d'intervention global sur le cours d'eau afin de pouvoir comparer les bénéfices et les inconvénients.

1.4.2.4 *Évacuation de la population*

Dans certains cas, le meilleur moyen de limiter les impacts des inondations sur la population consiste à évacuer les zones menacées. Cette alternative s'applique bien aux régions où la densité de population est faible, où la valeur des propriétés ne justifie pas d'autres types de contrôle et où les pertes de vies peuvent être évitées par l'évacuation. Il peut s'avérer moins coûteux de déplacer certains biens et équipements plutôt que de les protéger contre les inondations. Un bon service de prévision des inondations est relativement peu coûteux et peut être suffisamment efficace pour permettre l'évacuation complète. L'efficacité de ce moyen dépendra des caractéristiques hydrologiques du cours d'eau : de façon générale, plus le bassin de drainage est petit et la pente est forte, plus il est difficile de fournir un avertissement rapide à la population.

1.5 *Effet des couverts de glace et embâcles sur les inondations*

1.5.1 La problématique

Les inondations en présence de glace ont causé les plus hauts niveaux d'eau jamais enregistrés en plusieurs endroits au Canada, selon l'Hydrologie des

crues au Canada – Guide de planification et de conception (Rousselle et al., 1990). La résistance offerte et le blocage de l'écoulement des eaux par les glaces peuvent causer une hausse des niveaux dépassant largement les plus hauts niveaux d'eau atteints pour une crue plus rare sans glace. Il est donc pertinent et même nécessaire de considérer la présence de glace dans l'étude des inondations et des dommages qui y sont reliés.

1.5.2 L'effet de la présence de glace

Yoe (1984) propose une approche pour le calcul des dommages potentiels annuels en conditions de glace. Cette approche tient compte de la probabilité d'être en présence de conditions hydrauliques particulières lors d'une crue. Il décrit les inondations dues aux glaces comme étant de nature complexe et dangereuse. Les embâcles peuvent se former et se briser à l'intérieur de quelques heures, causant des inondations sans prévenir. La compréhension de la nature des embâcles et leur prévision est une science qui n'en est qu'à ses débuts. Rousselle et al. (1990) mentionnent que l'analyse des niveaux d'eau liés aux embâcles est plus difficile que pour les écoulements en eau libre, les embâcles étant essentiellement des phénomènes survenant de façon ponctuelle sur le cours d'eau. De plus, certains endroits peuvent être plus susceptibles à la formation d'embâcles : le risque de formation d'embâcles n'est donc pas réparti uniformément sur le cours d'eau. Les informations répertoriées sur les embâcles ne peuvent donc pas être transposées d'un endroit à l'autre. C'est pourquoi il est important de bien comprendre les caractéristiques physiques des embâcles.

La présence de glace sur un cours d'eau est susceptible de causer des inondations ou de les amplifier en réduisant la section d'écoulement ou la

capacité d'écoulement de la section. Le couvert de glace a pour effet d'augmenter le périmètre mouillé de la section et d'en réduire la capacité d'écoulement. Conséquemment, l'élévation du plan d'eau augmente à un niveau plus grand que le niveau atteint sans glace. Yoe (1984) distingue deux types d'inondations dues aux glaces : le premier survient en présence d'un couvert de glace stable, le second, lors de la formation d'embâcles. Rousselle et al. (1990), pour leur part, distinguent deux types d'embâcles : les embâcles de gel et les embâcles de dégel.

1.5.3 Le processus de formation du couvert de glace et des embâcles

Sur la plupart des rivières, le couvert de glace est formé par l'accumulation de cristaux de glace se développant dans l'écoulement. Ces cristaux flottent en surface pour éventuellement former une croûte. Cette croûte bloque le passage aux cristaux flottants qui s'accumulent en amont et contribuent ainsi à la progression du couvert de glace vers l'amont. C'est durant ce processus que surviennent les embâcles de gel (Rousselle et al., 1990).

L'augmentation du débit lors d'une crue et l'affaiblissement du couvert de glace provoque la rupture de la glace et initie son mouvement vers l'aval. Généralement, le processus de rupture débute aux endroits où la pente est plus forte et les vitesses d'écoulement plus grandes. En se déplaçant, les morceaux de glace se heurtent au couvert de glace toujours en place. À ce moment, les glaces en mouvement peuvent briser le couvert de glace ou bien passer sous le couvert pour s'arrêter un peu plus bas. Une fois le mouvement des glaces ainsi bloqué, la formation de l'embâcle peut progresser rapidement (Yoe, 1984).

L'inondation peut survenir en présence du couvert de glace stable ou en présence d'un embâcle. Dépendant du débit, l'un ou l'autre des types d'inondation surviendra. De plus faibles débits ne provoqueront pas la rupture du couvert de glace, alors qu'une crue plus forte pourra briser la glace et contribuer à former des embâcles. Le débit déterminant le type d'inondation varie d'un point à l'autre, selon plusieurs variables, dont la vitesse d'écoulement et la force de la glace (Yoe, 1984).

1.5.4 Les facteurs influençant la formation d'embâcles

Michel (1986), dans son cours sur l'ingénierie des rivières en présence de glace, identifie les principaux facteurs pouvant influencer la formation d'embâcles lors de la crue printanière :

- les conditions de formation des glaces durant l'hiver;
- la précocité, l'intensité et la durée de la crue printanière (une forte crue survenant tôt en saison causera de hauts embâcles, car la glace demeure très forte);
- les pluies printanières, alors que le sol est toujours gelé et que le ruissellement est rapide;
- l'orientation, dans le cas des grandes rivières : dans une rivière s'écoulant du sud vers le nord, la crue provenant de la fonte dans la partie sud descendra dans la partie nord où le couvert de glace est encore intact, ce qui favorise de forts embâcles;
- l'opération des barrages durant la crue printanière ;
- les singularités hydrauliques du cours d'eau : les embâcles peuvent être causés par la présence d'îles, de rétrécissements, de coudes, de

piliers de ponts ou d'élargissements de la rivière où l'eau devient peu profonde.

1.5.5 La résistance à l'écoulement d'un couvert de glace

La résistance à l'écoulement du couvert de glace d'une rivière peut être calculée à partir du coefficient de frottement du couvert. Il est cependant difficile de déterminer une valeur du coefficient n de Manning pour le couvert de glace, car sa valeur change sur une large gamme de valeurs au cours de l'hiver (Michel, 1986; Shen et Yapa, 1986).

Shen et Yapa (1986) ont développé un modèle empirique décrivant la variation dans le temps de la résistance offerte par le couvert de glace en fonction du climat et des conditions d'écoulement. Ils proposent une équation déterminant le coefficient n de Manning du dessous du couvert de glace.

Au début de l'hiver, lorsque le couvert de glace vient de se former, le couvert est généralement très rugueux. Sa rugosité diminue au cours de l'hiver à mesure que l'eau s'écoulant égalise le dessous du couvert de glace. La rugosité atteint sa valeur minimale à la fin de l'hiver, juste avant la crue printanière. La crue a pour effet d'ajouter du relief au-dessous du couvert de glace. La variation de la rugosité du couvert de glace à la fin de l'hiver dépendra du comportement du couvert de glace, des caractéristiques de l'écoulement et des conditions atmosphériques. Chow (1959) propose des valeurs du coefficient n de Manning pour le dessous du couvert de glace, en fonction de son relief et des vitesses d'écoulement. Ces valeurs varient de 0,010 à 0,025, pour une glace lisse à un couvert composé de blocs de glace dérivants.

Chow (1959) propose une équation pour calculer une valeur du coefficient n de Manning équivalente pour une section de rivière avec couvert de glace. Cette équation tient compte des coefficients n de Manning respectifs du lit de la rivière (indice 1) et du couvert de glace (indice 2), ainsi que des périmètres mouillés (P) provenant du lit et du cours d'eau. L'équation développée par Chow (1959) s'énonce comme suit :

$$n = \frac{n_2}{(1 + a)^{1/2}} (a^{3/4} + \varepsilon_2^{3/2})^{2/3}$$

où n = coefficient de Manning tenant compte du couvert de glace

n_1 = coefficient de Manning du lit de la rivière

n_2 = coefficient de Manning du couvert de glace

$\varepsilon_2 = n_1/n_2$

P_1 = périmètre mouillé du lit de la rivière

P_2 = périmètre mouillé du couvert de glace

$a = P_2/P_1$

Pour les cas où un embâcle est formé, Beltaos (1983) présente une série d'équations pour calculer le débit d'écoulement à travers cet embâcle. Il considère que le coefficient de Manning du couvert de glace formant l'embâcle est fonction du rayon hydraulique du couvert de glace et de l'épaisseur de l'embâcle. Cependant ces théories sont basées sur un nombre très restreint d'observations. De plus, la dernière théorie est difficilement applicable étant donnée la difficulté de connaître l'épaisseur de l'embâcle.

1.6 Résumé

Le risque est défini comme étant le produit de la probabilité d'un événement et de ses conséquences (CSA, 1991). Le risque hydrologique est la probabilité d'occurrence d'une crue d'amplitude donnée et le risque d'inondation est le produit de la probabilité qu'un territoire soit inondé et des dommages induits (Awadallah et al., 1999).

L'approche pour l'estimation du risque d'inondation la plus utilisée actuellement (Bouillon et al., 1999; Boyle et al., 1998; Das et Lee, 1988; Marche et McNeil, 1993) se résume comme suit : (1) déterminer les fréquences d'occurrence des crues; (2) estimer l'élévation de l'eau pour les différentes crues; (3) évaluer les dommages associés à chaque crue; (4) calculer le risque d'inondation.

Les méthodes de réduction des dommages peuvent être classées en deux catégories : les mesures structurelles et non structurelles. Les mesures les plus couramment appliquées sont la construction de réservoirs, de digues, de murs ou de conduites, la modification du lit du cours d'eau, la dérivation des eaux, la protection individuelle des bâtiments, la réduction du ruissellement, l'évacuation et la gestion des plaines inondables.

La résistance offerte par la présence de glace sur un cours d'eau peut causer une augmentation importante des niveaux d'inondation. On distingue deux types d'inondations dues aux glaces : causées par la présence d'un couvert de glace ou par la formation d'un embâcle. La présence de glace est difficilement prévisible et survient de façon ponctuelle. La résistance à l'écoulement d'un couvert de glace peut être considérée lors de simulations hydrauliques en calculant un coefficient n de Manning équivalent pour la section de rivière, qui

tient compte de la rugosité du couvert de glace et de l'augmentation du périmètre mouillé.

CHAPITRE 2

MÉTHODE POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE ET SA MINIMISATION

La méthodologie développée se divise en deux grandes étapes : d'abord, l'évaluation des dommages et du risque d'inondation, ensuite, l'exploitation de ces résultats pour minimiser les impacts des inondations.

L'approche adoptée pour l'évaluation du risque d'inondation est semblable à celle adoptée par plusieurs auteurs mentionnés dans la revue de littérature. Le risque d'inondation sur un site est évalué selon la démarche suivante : (1) déterminer la distribution de probabilité des crues, (2) simuler les écoulements et associer une cote du plan d'eau à chaque crue, (3) estimer les dommages causés par chaque crue et (4) calculer le risque d'inondation. Ensuite, la minimisation du risque requiert deux étapes additionnelles : (5) analyser le risque et ses composantes et (6) choisir une méthode de minimisation du risque en fonction du niveau de risque et des mécanismes d'inondation.

Les sections 2.1 à 2.6 décrivent plus en détails la démarche et les outils utilisés.

2.1 Première étape : la distribution de probabilité des crues

Le risque d'inondation est défini à la section 1.1 comme étant le produit de la probabilité d'occurrence des crues et des dommages causés. L'estimation du risque d'inondation requiert donc d'établir, en premier lieu, la distribution de probabilité des crues de la rivière à l'étude.

L'analyse fréquentielle des débits de crues permet d'associer une probabilité aux différents débits qui seront utilisés pour l'étude. Cette analyse fréquentielle

peut être réalisée par un grand choix de méthodes : il s'agit de sélectionner celle qui permet le meilleur ajustement à la série de débits étudiée.

2.2 Deuxième étape : simulations hydrauliques

Afin d'évaluer les dommages d'inondation, le niveau d'eau atteint le long de la rivière lors du passage des crues doit être connu. La simulation des écoulements en rivière par un modèle numérique permet d'estimer la cote du plan d'eau pour divers scénarios d'inondation. Une étude détaillée des mécanismes d'inondation et de la répartition du risque d'inondation exige la sélection d'un modèle numérique décrivant le niveau atteint en fonction du temps en plusieurs points le long du cours d'eau.

Le modèle d'écoulement unidimensionnel non permanent DAMBRK (Fread, 1984) permet d'obtenir les informations requises pour cette étude, tout en fournissant une représentation relativement simple des écoulements. Ce modèle a été développé par D. Fread du U.S. National Weather Service (Fread, 1984). La version datant de 1984 est utilisée dans le cadre de l'étude de la rivière Châteauguay. Ce programme a été conçu pour simuler l'hydrogramme résultant de la rupture d'un barrage et pour acheminer cette onde de crue dans le cours d'eau. Mais il permet également de simuler, en entrant un hydrogramme, la propagation d'une crue provenant de pluies ou de la fonte des neiges. Le modèle hydraulique est basé sur les équations unidimensionnelles complètes de St-Venant décrivant les écoulements non permanents. Ce système d'équations est résolu par une méthode de différences finies à quatre points. L'hydrogramme d'entrée est spécifié comme une fonction du temps. Le modèle peut simuler la présence de barrages en aval, la contraction et l'expansion des écoulements et les apports latéraux. Le modèle DAMBRK

calcule, entre autres résultats, la progression dans le temps de la cote du plan d'eau à diverses sections, ainsi que les vitesses d'écoulement.

Donc, à cette étape, afin de calculer les dommages correspondants, chaque crue est simulée pour évaluer de la cote du plan d'eau à diverses sections ainsi que les vitesses d'écoulement.

2.3 Troisième étape : estimation des dommages

L'estimation des dommages associés à chaque crue est entièrement réalisée à partir du logiciel DOMINO (DOMMages INondations) (Gagnon et al., 1998; SOBEK TECHNOLOGIES Inc., 1998). Cette méthode automatisée a été développée par des chercheurs de l'École Polytechnique de Montréal pour Hydro-Québec.

La figure 2.1 présente un schéma du fonctionnement du logiciel DOMINO. Sur cette figure, les éléments encadrés représentent les données devant être intégrées au logiciel pour effectuer le calcul des impacts. En résumé, le logiciel DOMINO permet de délimiter un site et de constituer un modèle numérique du terrain naturel de ce site à partir de données sur le relief. Les résultats des différents scénarios de simulations hydrauliques sont intégrés au logiciel afin de constituer pour chacun un modèle numérique de la surface libre des eaux et un modèle numérique des vitesses. Le calcul de l'intersection entre le modèle du terrain et celui des surfaces d'eau permet d'établir les limites d'inondation. L'intégration dans DOMINO des rôles d'évaluation permet de compiler et de positionner les bâtiments contenus à l'intérieur des limites du site. Le calcul des bâtiments en zones inondées permet de déterminer les conditions d'inondation de chacune des entités identifiées sur le site, soit la profondeur et

la vitesse d'écoulement. Les impacts de chaque scénario d'inondation sur les bâtiments, sur leur contenu et sur la population sont évalués à partir du rôle d'évaluation et des conditions d'inondation prévalant pour chaque entité. Cette étape d'estimation nécessite l'intégration au logiciel de critères de pondération et d'estimation des impacts basés sur la profondeur et la vitesse d'écoulement. Finalement les résultats des impacts calculés sur l'ensemble du site sont cumulés et présentés sous forme de rapport pour chaque scénario d'inondation simulé.

DOMINO

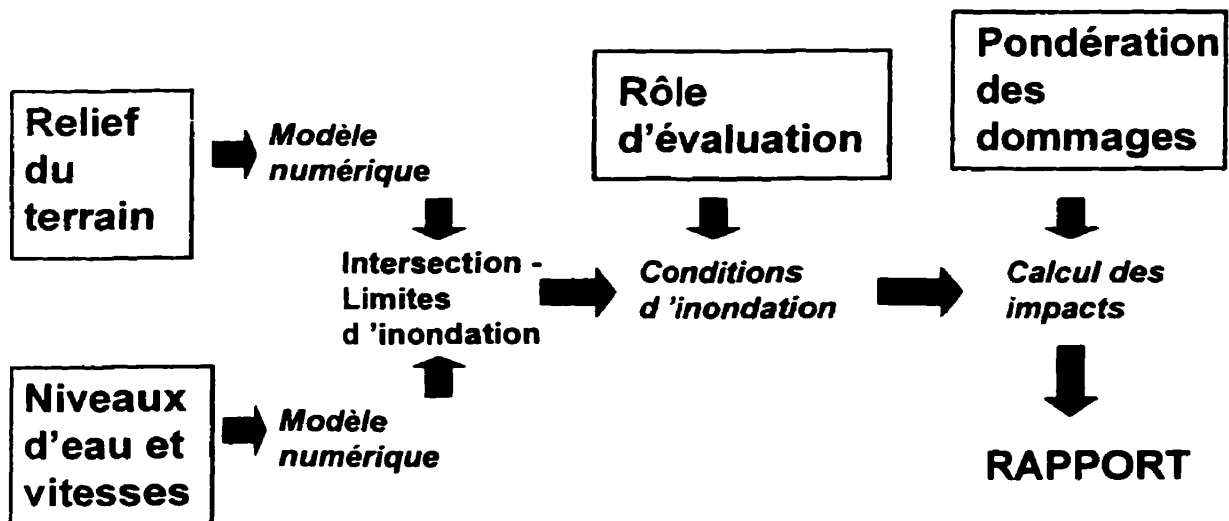


Figure 2.1 : Schéma de fonctionnement du logiciel DOMINO

2.4 Quatrième étape : calcul du risque d'inondation

Les probabilités d'occurrence associées à chaque crue et les dommages découlant de ces crues servent à calculer le risque d'inondation. Le risque d'inondation est estimé pour une crue spécifique, de façon cumulée ou de façon globale.

Le risque d'inondation d'une crue spécifique est calculé en multipliant la probabilité d'occurrence annuelle de l'intervalle d'amplitude de crue entourant la crue spécifique par les dommages moyens pouvant être causés par cet intervalle de crue. L'utilisation d'un intervalle de crue s'impose, car la probabilité d'obtenir une crue d'une amplitude précise est presque nulle, et il faudrait calculer les dommages associés à un nombre illimité de crues pour obtenir une représentation complète du risque d'inondation global.

Le risque cumulé pour un événement de crue donné est la somme du risque provenant de toutes les crues d'amplitude égale ou inférieure.

Le risque global d'inondation, ou dommages potentiels moyens annuels, est la somme du risque d'inondation provenant de toutes les crues possibles. Il est donc équivalent à l'aire sous la courbe de la probabilité d'occurrence de la crue en fonction des dommages occasionnés.

2.5 Cinquième étape : analyse du risque

L'analyse du risque estimé vise à identifier l'existence d'un risque considéré inacceptable et à établir quelle en est la cause principale. À cette fin, les limites du risque acceptable doivent être établies (par la population) pour les différents

types d'impacts d'inondation, soit les pertes économiques (ou dommages directs), les pertes de vies potentielles et les dommages indirects. Le risque est ensuite analysé en fonction de ces limites. L'existence d'un risque considéré inacceptable indique que des interventions sont requises pour minimiser les impacts des inondations et pour éliminer ce risque.

Cette étape mène au choix de la crue de projet, c'est-à-dire la crue d'amplitude maximale pour laquelle le risque doit être minimisé. L'analyse du risque permet également d'estimer les bénéfices possibles d'un projet de minimisation des impacts. La façon dont le risque croît en fonction de l'amplitude des crues donne une indication de la crue permettant d'optimiser les bénéfices d'une intervention.

2.6 Sixième étape : minimisation du risque

La décision d'intervenir sur un cours d'eau pour minimiser le risque est prise en fonction des résultats de l'analyse du risque. Pour chaque site où des interventions sont justifiées par l'existence d'un risque inacceptable, des scénarios de minimisation du risque sont élaborés et simulés afin d'en mesurer l'efficacité. Les méthodes d'intervention potentielles doivent tenir compte du niveau de risque et des mécanismes d'inondation propres à chaque site. La méthode à préconiser est celle assurant la protection requise sur le site tout en permettant le maximum de bénéfices.

CHAPITRE 3

CALCUL DU RISQUE D'INONDATION SUR LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

3.1 Description du territoire retenu pour l'étude

La méthodologie d'évaluation du risque d'inondation et de minimisation des impacts présentée dans la section précédente a été appliquée à un tronçon de la rivière Châteauguay, un affluent du fleuve Saint-Laurent, situé au sud de Montréal.

Cette rivière a été sélectionnée pour cette étude en raison de la fréquence de ses crues causant des dommages et de l'accessibilité aux informations de base nécessaires.

3.1.1 Aspect géographique

Dans le document intitulé « Caractéristiques physiques et démographiques, eaux de surface, bassin versant de la rivière Châteauguay », produit par le Ministère des Richesses naturelles du Québec (Desmeules et Gélinas, 1981), on retrouve une description des caractéristiques physiques du bassin de la rivière Châteauguay. Les informations qui suivent ont été tirées de ce document.

La rivière Châteauguay prend sa source dans l'état de New York aux États-Unis. Après un parcours de 53 km dans ce pays, elle pénètre au Québec par la MRC du Haut-Saint-Laurent, traverse les MRC Beauharnois-Salaberry et Le

Le bassin de la rivière Châteauguay couvre 2543 km² dont plus de 43% sont situés aux États-Unis. Il empiète sur deux régions physiographiques distinctes, soit les Basses-Terres-du-Saint-Laurent et les Appalaches. Les basses terres forment une plaine qui occupe presque toute la partie aval du bassin, située au Québec. Leur altitude est inférieure à 30 mètres le long des rives du Saint-Laurent, et la pente augmente graduellement vers le sud-est pour atteindre le plateau appalachien. Du côté américain, le bassin s'étend sur une région dont le relief est très varié, soit la région des monts Adirondacks, faisant partie des Appalaches. Le relief du bassin de la Châteauguay passe de vallonné à montagneux à mesure qu'on se dirige vers l'amont. La brusque diminution de la pente quelques kilomètres après la frontière favorise la présence de vastes plaines d'inondation. La rivière Châteauguay coule du sud vers le nord.

La rivière Châteauguay traverse plusieurs municipalités et petites localités sur son parcours au Québec. Ces municipalités et localités peuvent être identifiées sur la figure 3.2.

De la frontière américaine à son exutoire, la rivière traverse les municipalités de Hinchinbrooke, Godmanchester, la localité de Athelstan, la ville de Huntingdon, la localité de Dewittville, les municipalités de Saint-Malachie-d'Ormstown, Ormstown, la localité de Allan's Corners, les municipalités de Très-Saint-Sacrement, Saint-Paul-de-Châteauguay, Sainte-Martine, Mercier et Châteauguay. Les municipalités de Huntingdon, Ormstown, Sainte-Martine et Châteauguay possèdent des noyaux urbains.

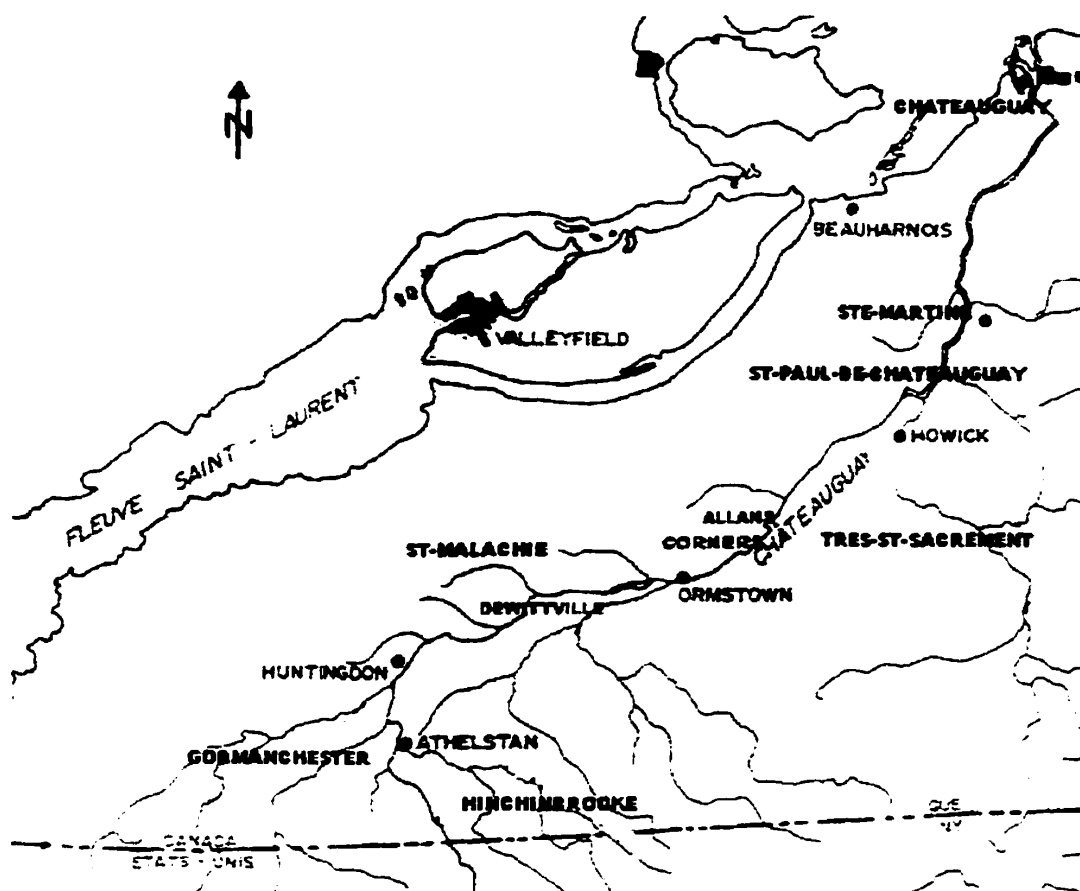


Figure 3.2 : Municipalités traversées par la rivière Châteauguay

3.1.2 Les inondations

Toujours selon l'étude effectuée par Desmeules et Gélinas (1981), la crue de printemps contribue pour 40% de l'écoulement annuel de la rivière Châteauguay. Les inondations dans le bassin se produisent principalement lors des crues printanières, mais aussi à l'occasion lors de fortes pluies au début de l'été et en automne. Même si le problème des inondations n'est pas crucial sur le bassin de la rivière Châteauguay, la plupart des rivières du haut du bassin, particulièrement à la Truite et aux Outardes, débordent presque à chaque année. Ces débordements touchent principalement les champs, mais

causent également des perturbations et des dommages aux routes, aux bâtiments de ferme et aux habitations.

La rivière Châteauguay sort de son lit principalement dans la région située entre Athelstan et Huntingdon, où se forment de grandes plaines inondées. Les régions de Sainte-Martine et de Châteauguay sont aussi parfois touchées par les inondations.

La présence de vieux ouvrages hydrauliques sur la rivière, dans la ville de Huntingdon, à Dewittville, à Ormstown et à Sainte-Martine, semble causer certains problèmes de gestion du niveau des eaux, notamment aux barrages de Huntingdon et de Sainte-Martine.

3.2 *Données hydrologiques*

3.2.1 Stations de mesure des débits sur le bassin

Le tableau 3.1 présente la liste des stations de mesure de débits ayant été en fonction dans le bassin de la rivière Châteauguay. Cependant, depuis 1990, il ne reste qu'une station en opération sur la rivière Châteauguay, soit la station 030905, située vers l'aval du bassin versant, soit à 4,35 km en amont du pont-route 132.

Les stations 030901 et 030905 sont les seules à fournir de longues séries de mesures de débits sur la rivière Châteauguay, et ce sont principalement ces données qui ont été utilisées dans cette étude.

Tableau 3.1 : Stations hydrométriques de la rivière Châteauguay
(adapté de Lapointe, 1980)

Nom de la station	Numéro	Bassin (km²)	Années d'opération
Châteauguay à 0,32 km en aval du pont-route 205	030901	2460	1920-1971
Châteauguay au pont-route 132 à Châteauguay	030902	2510	1938-1939
Châteauguay à 0,16 km en aval du pont du CN à Ste-Martine	030904	2350	1967-1970
Châteauguay à 4,35 km en amont du pont-route 132	030905	2490	1970-
Châteauguay au pont-route à Ste-Martine	030911	2310	1974
Châteauguay au pont-route à Ormstown	030912	1380	1974
Châteauguay au pont-route 202 à Huntingdon	030913	1050	1973
Des Anglais au pont-route à Howick	030903	712	1967-1973
Des Anglais à 1,13 km en aval du pont-route à Riverfield	030907	686	1973-
Des Anglais au pont-route à Aubrey	030916		1974
Ruisseau Norton à 4,51 km en aval du barrage de Ste-Clothilde	030906	246	1973-1975
Ruisseau Norton au barrage à Ste-Clothilde	030909	241	1973-75
Ruisseau Norton à 3,54 km en aval du barrage de Ste-Clothilde	030915		1974 (1979-1989)
A la Truite à 0,97 km en amont du pont-route à Kelvingroove	030908	409	1973-1982
Hinchinbrooke à Athelstan	030914		1974
Aux Outardes à 0,16 km de la rivière aux Outardes	030910	138	1974-1975
Aux Outardes-est au pont-route près de Anderson's Corners	030917	133	1975-(1982)

3.2.2 Analyse de fréquence

L'analyse de fréquence des crues sur la rivière Châteauguay, réalisée par Awadallah et al. (1999), est basée sur les données combinées des débits maximums journaliers mesurés à la station 030901 de 1921 à 1971 et à la station 030905 de 1970 à 1996.

Pour la présente étude, les données de la crue de 1998 ont été ajoutées afin de mettre à jour la distribution de fréquence. L'ajout de cette crue particulièrement

forte a modifié de façon considérable l'allure de l'extrémité de la courbe de distribution de fréquence.

En fait, le 30 mars 1998, un débit maximum journalier de 1100 m³/s a été enregistré à la station 030905. Selon la courbe calculée sans les données de 1998, ce débit correspond à la crue décennale. Une fois la crue du 30 mars 1998 ajoutée aux données, cette même crue devient la crue millénaire. Ce fait met en évidence l'impact de l'occurrence de fortes crues sur la distribution de fréquence des crues, qui se base sur des séries de données relativement très limitées. La courbe utilisée pour cette étude, et incluant la crue de 1998, est présentée à la figure 3.3.

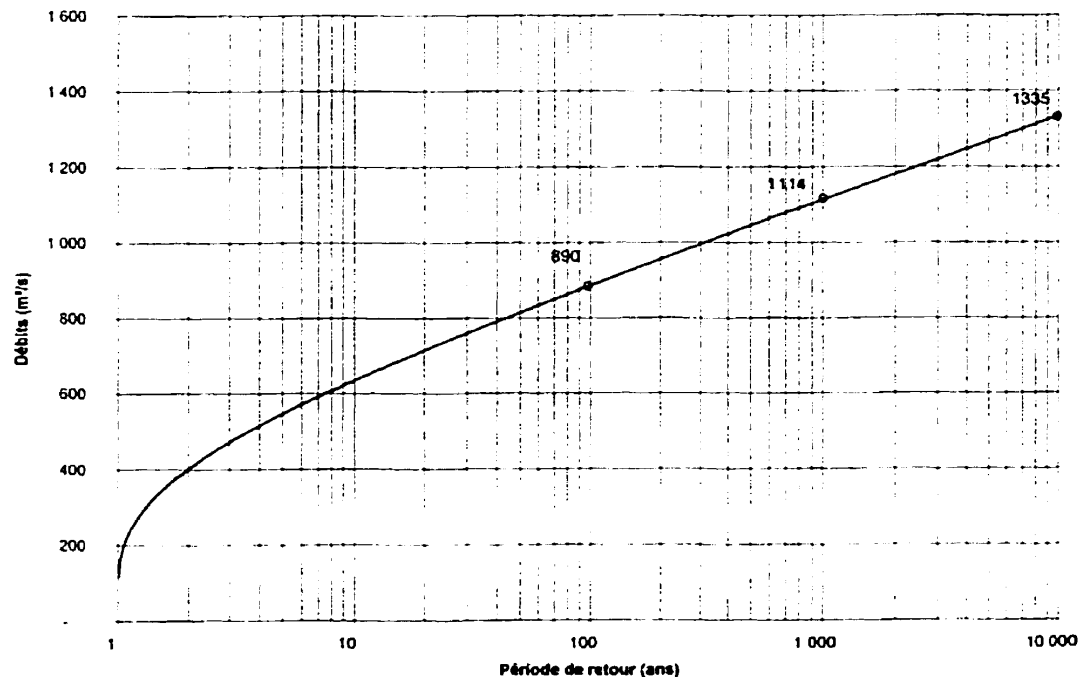


Figure 3.3 : Distribution de fréquence des crues (stations 030901 et 030905)

3.2.3 Choix des crues pour l'analyse

Le risque global d'inondation est calculé en cumulant le produit des dommages et de la probabilité associée à chaque crue. Cependant il est pratiquement impossible d'intégrer directement sous la courbe fréquence / dommages, car les dommages ne peuvent être calculés de façon continue. L'utilisation d'intervalles de probabilité de crues pour lesquelles les dommages moyens sont évalués s'impose. Pour cette étude de la rivière Châteauguay, le risque est calculé à partir des dommages estimés pour des crues de périodes de retour finies, choisies de façon arbitraire comme étant les crues de 2,3,10,20,100,1000 et 10 000 ans. La crue de référence sera celle correspondant au débit moyen du mois d'avril.

3.2.4 Probabilités associées à chaque événement

Les intervalles de probabilités associés aux crues sélectionnées pour l'étude sont présentés au tableau 3.2. La première colonne du tableau 3.2 contient le débit d'écoulement passant à la station de mesure 030905, pour chaque événement de crue sélectionné. La seconde colonne contient la date à laquelle s'est produit un événement de crue où un débit semblable a été enregistré. La colonne suivante énumère les périodes de retour des événements de crue sélectionnés. La quatrième colonne décrit l'intervalle d'amplitude de crues associé à chacune des crues sélectionnées. La cinquième colonne contient la probabilité d'occurrence annuelle d'une crue comprise dans l'intervalle de crues. La dernière colonne présente la probabilité d'occurrence annuelle d'une crue semblable ou de plus forte amplitude.

Tableau 3.2 : Probabilités associées aux crues

Débit enregistré à Châteauguay (m ³ /s)	Événement	T (ans)	Intervalle de l'événement (ans)	Probabilité d'un événement semblable	Probabilité d'un événement semblable ou plus rare
105	Avril moyen	1	1-2	0,5	1
402	Avril 1971	2	2-3	0,17	0,5
473	Avril 1963	3	3-10	0,23	0,33
640		10	10-20	0,05	0,10
730		20	20-100	0,04	0,05
886		100	100-1000	0,009	0,01
1114	Mars 1998	1000	1000-10000	0,0009	0,001
1335		10000	10000 et plus	0,0001	0,0001

3.3 Simulations hydrauliques avec le logiciel DAMBRK

3.3.1 Débits

Pour les fins de cette étude, le bassin versant de la Châteauguay a été divisé en douze sous-bassins correspondant à onze affluents et au bassin drainant l'amont du cours d'eau principal, à partir de la frontière américaine.

Les débits correspondant aux crues sélectionnées ont été extraits de la courbe de distribution de fréquence des crues des stations 030901 et 030905 (figure 3.3) sur la rivière Châteauguay. La simulation des écoulements et l'établissement des niveaux du plan d'eau requièrent l'évaluation des débits sur toute la longueur du cours d'eau. Il est donc nécessaire d'estimer l'apport des affluents associé à chaque crue.

Cette estimation a été réalisée en considérant le rapport des aires des bassins versants. La méthode de Hoang, utilisée à cette fin par Bouillon (1998), a été

appliquée à chaque affluent de la rivière Châteauguay. L'équation de la méthode de Hoang est la suivante :

$$Q_1 = Q_2 \times (A_1/A_2)^\alpha$$

Où :	Q_1	Débit inconnu de la rivière 1
	Q_2	Débit connu de la rivière 2
	A_1	Superficie drainée par la rivière 1 à l'endroit où l'on veut estimer le débit
	A_2	Superficie drainée par la rivière 2 à l'endroit où le débit est connu
	α	Exposant caractérisant le type d'écoulement

L'exposant α des divers sous-bassins a été estimé à partir des débits mesurés sur quelques cours d'eau du bassin versant de la Châteauguay.

Il est important de noter que l'estimation des débits par cette méthode ne fournit qu'une représentation approximative de la répartition de la provenance des débits mesurés dans la partie aval du bassin versant de la rivière Châteauguay, aux stations 030901 et 030905. Les débits résultant de simulations hydrologiques pourraient fournir une représentation plus juste, mais ce degré de précision n'est pas requis et ces données ne sont pas disponibles présentement pour cette application. Les débits estimés et utilisés pour le bassin de la rivière Châteauguay sont présentés au tableau 3.3.

3.3.2 Sections d'écoulement

La géométrie des sections d'écoulement a été établie à partir des cartes topographiques disponibles, dont l'échelle varie de 1 : 2000 à 1 : 20 000.

Cependant les données sur la bathymétrie de la rivière Châteauguay n'étant pas

Tableau 3.3 : Répartition des apports en m³/s des sous-bassins de la rivière Châteauguay

	Châteauguay à Athelstan	Hinchin brooke	Oak	A la Truite	Dewitt	Outardes	Turcot	Des Anglais	Des Fèves	Total barrage Ste-Martine
Bassin (km²)	461	128	73	427	56	230	131	727	65	
Alpha	0.77	0.91	0.91	0.91	1.01	1.01	1.3	1.3	1.3	
Avril	29	7	4	21	2	9	2	21	1	97
1/2	109	27	16	81	9	36	9	81	4	371
1/3	129	32	19	95	10	42	10	95	4	436
1/10	174	43	26	128	14	57	14	128	6	590
1/20	199	49	29	146	16	66	16	147	6	673
1/100	242	60	36	178	19	80	19	179	8	820
1/1000	303	75	45	223	24	100	24	224	10	1027
1/10 000	363	89	54	267	29	120	29	268	12	1231

disponibles, la géométrie du lit de la rivière sous le niveau de la berge a dû être établie de façon arbitraire. La section d'écoulement du lit de la rivière Châteauguay a donc été posée comme étant trapézoïdale, avec une pente longitudinale constante. Les erreurs sur la simulation des écoulements pouvant être engendrées par cette approximation seront compensées lors de l'étape de calibration du modèle, par l'ajustement du coefficient de Manning.

3.3.3 Sections de contrôle

Plusieurs ouvrages hydrauliques modifient l'écoulement sur la rivière Châteauguay. Ces seuils ou barrages constituent des sections de contrôle dont la relation entre le débit et le niveau d'écoulement doit être décrite dans le fichier d'entrée de DAMBRK.

Sur le tronçon étudié, de la frontière américaine au barrage de Sainte-Martine, quatre sections de contrôle ont été incorporées au modèle numérique : le barrage de Huntingdon, l'ancien barrage de Ormstown, le barrage de Dewittville et le seuil de Sainte-Martine. Ces sections de contrôle sont indiquées sur la figure 3.1 montrant le bassin versant de la rivière Châteauguay.

Les relations débit / niveau à ces sections ont été établies à partir des profils des plans d'eau provenant du service Hydrologie et cartographie, de la direction du Milieu hydrique, au ministère de l'Environnement et de la faune. Les profils de la rivière Châteauguay ont été tracés pour Huntingdon (1995), Ormstown, Sainte-Martine (1990) et Châteauguay (1991). Les niveaux d'eau ont été calculés pour quelques débits constants et pour les crues de 20 ans et de 100 ans. Les cartes du risque d'inondation du ministère de l'Environnement et de la faune, pour ces secteurs, sont basées sur ces profils du plan d'eau.

La plus forte crue pour laquelle le profil d'écoulement a été établi étant la crue centenaire, il est nécessaire d'extrapoler ces valeurs afin d'estimer le niveau atteint lors du passage des crues millénaire et décennaire. Cette extrapolation est réalisée en établissant l'équation du débit traversant le seuil. L'équation d'un déversoir rectangulaire à paroi mince a servi à estimer cette relation. Cette équation est de la forme suivante :

$$Q = C \cdot b \cdot (h - h_b)^{3/2} \quad \text{où:}$$

Q	est le débit traversant le seuil
b	est la longueur du seuil
h	est la cote du plan d'eau
h_b	est la cote du seuil
C	est un coefficient

Le tableau 3.4 contient les relations débit / niveau basées sur l'étude du service Hydrologie et cartographie du ministère de l'Environnement et de la faune et sur les niveaux observés lors de la crue printanière de 1998.

Tableau 3.4 : Relations débit / niveau des sections de contrôle

Barrage Ste-Martine		Barrage Dewittville		Barrage Huntingdon		Rapide Ormstown	
Cote du seuil: 32,54 m		Cote du seuil: 39,17 m		Cote du seuil: 45,7 m		Cote du seuil: 33,56 m	
Débit (m³/s)	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Niveau (m)
11	32,71	39	40,21	14	46,00	14	34,17
20	32,79	61	40,56	39	46,30	50	35,00
53	33,01	142	41,61	57	46,46	142	36,45
97	33,25	227	42,51	70	46,58	283	37,76
98	33,25	291	43,12	126	47,00	375	38,63
198	33,68	324	43,41	142	47,11	412	38,95
400	34,36	368	43,18	171	47,29	566	39,82
501	34,66	481	43,97	285	47,94	761	41,19
708	35,20	638	44,61	291	47,97	906	42,13
833	35,51	736	45,15	324	48,14		
1005	35,91	850	45,75	338	48,21		
1202	36,33			368	48,36		
				481	48,24		
				638	48,76		
				793	49,24		

Le barrage de Huntingdon possède un déversoir et un évacuateur de crues. Le tronçon de rivière juste en aval de ce barrage est contenu entre deux murs de béton. À Ormstown, le barrage s'est écroulé, et il n'en reste que des blocs de béton près de chaque rive et sur le fond, ce qui cause un écoulement torrentiel. Toutefois, il semble que lors du passage de la crue millénaire, en 1998, le rapide était noyé. À Sainte-Martine, la section de contrôle est un seuil.

3.3.4 Calibration

Trop de paramètres dont la valeur est inconnue et estimée entrent dans la constitution du modèle numérique des écoulements de la rivière Châteauguay pour prétendre que la cote du plan d'eau simulé est exacte. Entre autres la bathymétrie, la présence d'obstacles à l'écoulement, les relations débit / niveau aux sections de contrôle et la rugosité du lit de la rivière sont estimées. Il est donc essentiel de calibrer le modèle d'écoulement à partir d'observations faites sur le terrain.

La calibration du modèle numérique des écoulements a été réalisée en simulant les débits estimés par le ministère de l'Environnement et de la faune pour les crues de 20 ans et de 100 ans, et en ajustant certains paramètres afin d'obtenir les profils du plan d'eau adéquats. Le Ministère a également produit, à partir des mêmes données, des cartes du risque d'inondation, à l'échelle 1 : 2000, illustrant les plaines d'inondation des crues de 20 ans et de 100 ans. Pour la calibration dans les secteurs ruraux où le Ministère n'a pas réalisé d'étude, la calibration est basée sur des cartes à plus grande échelle élaborées par la MRC du Haut-St-Laurent.

La calibration des modèles d'écoulement est effectuée en faisant varier les valeurs du coefficient de résistance de Manning, par l'ajout de coefficients de contraction et d'expansion ou sinon par la modification des sections d'écoulement. Subséquemment, les résultats de la simulation des crues plus fortes ont été validés à partir des observations de la crue du 30 mars 1998. Au besoin, le modèle a été calibré de nouveau, pour la couche supérieure d'écoulement, à partir de ces données.

3.4 Estimation des dommages avec le logiciel DOMINO

3.4.1 Choix des sites

Dix sites d'étude des dommages ont été délimités sur la rivière Châteauguay, en zones rurales et urbaines. La localisation des sites est illustrée à la figure 3.4.

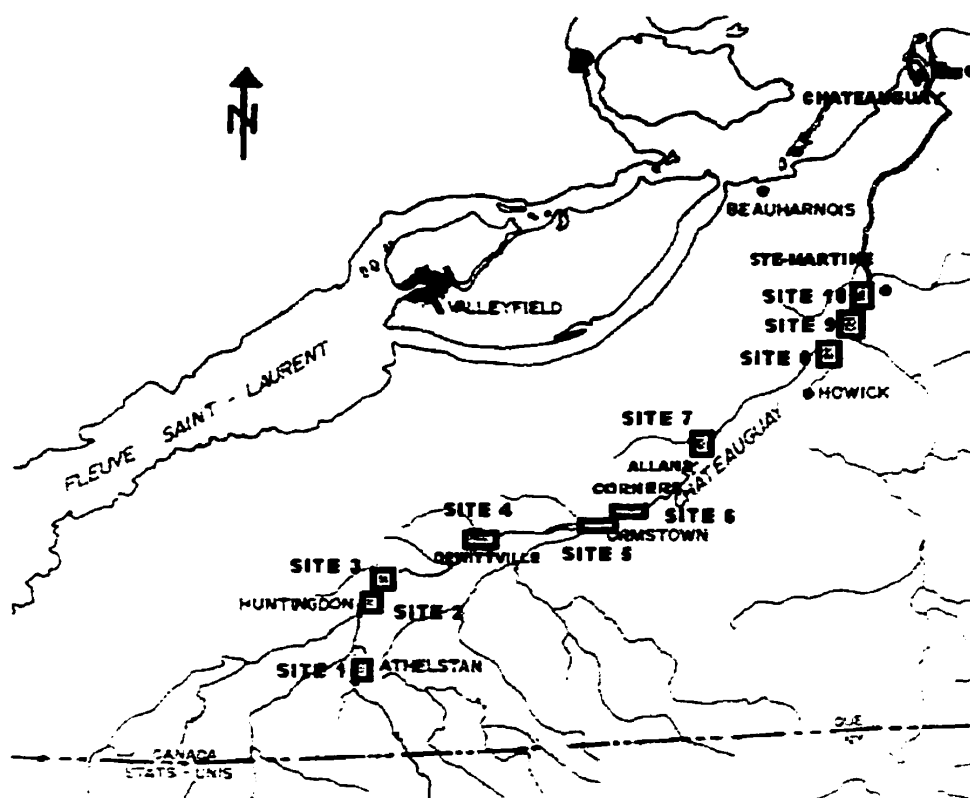


Figure 3.4 : Localisation des sites d'étude

Le tableau 3.5 présente les caractéristiques des dix sites et l'échelle de cartes topographiques disponibles à chacun de ces emplacements pour élaborer les modèles numériques de terrain. La longueur de rivière indiquée est le tronçon

sur lequel les inondations sont simulées à l'intérieur du site, et la superficie est celle couverte par chacun des sites d'étude.

Tableau 3.5 : Caractéristiques des sites et cartographie disponible

Site	Emplacement	Type de zone	Longueur de rivière (km)	Superficie (km ²)	Échelle des cartes
1	Près d'Athelstan à Hinchinbrooke	Rural	2,06	3,54	1 : 20 000
2	Huntingdon (partie amont)	Urbain	0,98	0,64	1 : 2000
3	Huntingdon (partie aval)	Urbain	0,60	0,36	1 : 2000
4	Dewittville	Rural	0,90	1,60	1 : 10 000
5	Ormstown (amont du barrage)	Urbain	0,95	0,55	1 : 2000
6	Ormstown en aval du barrage	Urbain	0,50	0,39	1 : 2000
7	Allan's Corners à Très-St-Sacrement	Rural	1,83	4,80	1 : 20 000
8	St-Paul-de-Châteauguay	Rural	1,42	1,02	1 : 2000
9	St-Paul-de-Châteauguay	Rural	1,19	1,00	1 : 2000
10	Ste-Martine	Urbain	0,91	0,61	1 : 2000

Les sites choisis couvrent tous les secteurs les plus densément habités, soit les villes de Huntingdon, Ormstown et Sainte-Martine. Les agglomérations en zones rurales sont aussi couvertes, soit Athelstan, Dewittville et Allan's Corners. Les sites situés à St-Paul sont en zone rurale, et on y retrouve plusieurs habitations et bâtiments de ferme aux abords de la rivière.

Les tronçons de rivière pour lesquels les impacts ont été évalués varient de 0,5 km à 2,06 km, les plus longs étant situés en zone rurale. Les superficies varient également de façon considérable, ainsi que le rapport entre la longueur de rivière et la superficie du site, dû à différentes formes des sites. Pour trois des cinq sites situés en zone rurale, les sites 1, 4 et 7, on ne possède que peu d'information sur le relief du terrain et son occupation. La précision des

dommages calculés en sera affectée, car il sera difficile d'établir les limites des zones inondées et de localiser les bâtiments de façon précise.

3.4.2 Position et valeur des bâtiments

La position et la valeur des bâtiments sur les sites délimités pour l'évaluation des dommages ont été obtenues en intégrant au logiciel DOMINO les rôles d'évaluation des municipalités concernées. Les rôles d'évaluation utilisés pour cette étude datent de 1996.

Le nombre de bâtiments et la densité de bâtiments par site sont présentés au tableau 3.6. Le nombre de bâtiments situés dans les plaines d'inondation des crues de 20 ans et de 10 000 ans peuvent donner une image de la répartition des bâtiments des sites par rapport à la rivière et ses zones de débordement.

La densité de population, pour les sites en zone urbaine, varie de 203 à 534 bâtiments par kilomètre carré. Pour ceux en zone rurale, elle varie de 6 à 65 bâtiments par kilomètre carré.

Les matricules associés à chaque unité d'évaluation donnent les coordonnées du centre du terrain. Par défaut, le logiciel place le bâtiment sur ce point. Il peut donc s'avérer pertinent de vérifier l'emplacement réel du bâtiment sur le terrain et d'en corriger la position, particulièrement lorsque le terrain de l'unité d'évaluation a une grande étendue. La position exacte des bâtiments situés sur les sites étudiés a été relevée sur les cartes à l'échelle 1 : 2000 et corrigée dans DOMINO.

Tableau 3.6 : Nombre de bâtiments, densité et répartition des unités par site

Site	Unités d'évaluation sur le site	Densité (bâtiments/km ²)	Type de zone	Unités d'évaluation dans la plaine 20 ans	Unités d'évaluation dans la plaine 10 000 ans
1	22	6	Rural	5	9
2	162	254	Urbain	3	41
3	192	534	Urbain	33	54
4	50	31	Rural	9	19
5	152	276	Urbain	1	47
6	122	310	Urbain	0	42
7	42	9	Rural	7	18
8	56	55	Rural	1	26
9	65	65	Rural	0	13
10	124	203	Urbain	0	18

De plus, des décalages parfois importants de la position de l'ensemble des bâtiments ont été observés lors de la superposition des bâtiments aux sites. Ces décalages sont probablement attribuables à l'utilisation par les municipalités de matrices graphiques plus anciennes que les cartes topographiques utilisées. Ce décalage existe malgré la conversion des systèmes de position de NAD 27 à NAD 83. Une recherche stratégique des valeurs de ces décalages à partir des positions réelles et des positions données par les matricules a permis de corriger de façon systématique ce décalage, dans les secteurs où la cartographie à l'échelle 1 : 2000 est disponible.

3.4.3 Critères d'estimation des impacts

Les facteurs de pondération des impacts utilisés dans cette étude proviennent principalement de ASCE (1988). Le logiciel DOMINO ne tient compte que des dommages aux bâtiments et à leur contenu et des pertes de vies potentielles.

Les impacts sont estimés uniquement en fonction des profondeurs et des vitesses d'écoulement. Les dommages à tous les types de bâtiments sont évalués à partir des critères de dommages, malgré que ceux-ci aient été élaborés pour les unités résidentielles (ASCE, 1988).

3.4.3.1 *Pertes aux bâtiments*

Les pertes aux bâtiments sont évaluées en pourcentage du montant de leur évaluation municipale. La valeur marchande est considérée comme étant de 1.25 fois le montant de l'évaluation.

L'écoulement est supposé en eau libre, c'est-à-dire qu'il n'y a ni glace, ni débris ou bois flottant. Le facteur de pondération multipliant le montant de l'évaluation est le plus élevé des suivants :

Facteur F2, pondération en fonction de la profondeur :

1.22 < profondeur < 1.83 m	F2 = 0.20
1.83 < profondeur < 2.44 m	F2 = 0.25
2.44 < profondeur < 3.05 m	F2 = 0.50
3.05 < profondeur < 3.66 m	F2 = 0.80
profondeur > 3.66 m	F2 = 1.25

Facteur F1, pondération en fonction du produit de la profondeur et de la vitesse :

profondeur x vitesse < 1.86 m ² /s	F1 = 0
profondeur x vitesse > 1.86 m ² /s	F1 = 1.25

3.4.3.2 *Pertes au contenu*

Les pertes au contenu sont évaluées en pourcentage du montant de leur évaluation municipale.

Facteur F3 multipliant le montant de l'évaluation :

profondeur > 0 mètre	F3 = 0.1 (inondation du sous-sol)
profondeur > 2 m	F3 = 0.4
Si F1 ou F2 est égal à 1.25 :	F3 = 0.625

Le montant de 0.625 représente la perte totale des biens, estimés à 50 % du montant évalué du bâtiment, multiplié par un facteur de 1.25, pour perte totale.

3.4.3.3 *Pertes de vies potentielles*

Les pertes de vies potentielles sont évaluées en fonction du nombre moyen d'habitants par maison. Pour cette étude, ce nombre a été fixé à 2.20.

Le facteur de pondération F4 multipliant le nombre d'habitants par maison est déterminé en choisissant le plus élevé, déterminé comme suit :

profondeur < 1 m	F4 = 0
profondeur > 1 m	F4 = 1
produit profondeur x vitesse < 0.65 m ² /s	F4 = 0
produit profondeur x vitesse > 0.65 m ² /s	F4 = 1

3.4.4 Évaluation des dommages sur les sites

Le tableau 3.7 présente les impacts des inondations simulées sur la rivière Châteauguay. La troisième colonne du tableau 3.7 résume les coûts des dommages évalués à l'aide du logiciel DOMINO, et la sixième colonne résume les pertes de vies potentielles.

Tableau 3.7 : Impacts des inondations sur la rivière Châteauguay

Site	T (ans)	Coût (\$)	Risque (\$/an)	Risque cumulé (\$/an)	Pertes de vies potentielles	Bâtiments inondés
1 Hinchinbrooke	2	2920	496	496	0	2
	3	2920	672	1168	2	2
	10	33950	1698	2866	4	5
	20	33950	1358	4224	4	5
	100	69827	628	4852	11	9
	1000	101599	91	4943	17	9
	10000	112071	11	4955	19	9
2 Huntingdon	2	360	61	61	0	1
	3	360	83	144	0	1
	10	360	18	162	0	1
	20	12300	492	654	0	3
	100	213370	1920	2574	2	15
	1000	289180	260	2835	2	28
	10000	632200	63	2898	13	41
3 Huntingdon	2	3710	631	631	0	1
	3	14410	3314	3945	0	3
	10	177160	8858	12803	17	29
	20	279760	11190	23993	33	33
	100	491567	4424	28418	50	41
	1000	567359	511	28928	57	43
	10000	703809	70	28999	72	54
4 Dewittville	2	35970	6115	6115	11	5
	3	62030	14267	20382	11	6
	10	472091	23605	43986	15	8
	20	536461	21458	65445	15	9
	100	573891	5165	70610	19	10
	1000	923801	831	71441	26	16
	10000	1033905	103	71545	35	19
5 Ormstown	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	10980	439	439	0	1
	100	42030	378	817	2	5
	1000	222300	200	1018	15	22
	10000	896308	90	1107	66	47
6 Aval barrage Ormstown	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0
	100	37070	334	334	0	5
	1000	96360	87	420	11	13
	10000	390300	39	459	17	42

Tableau 3.7 : Impacts des inondations sur la rivière Châteauguay (suite)

Site	T (ans)	Coût (\$)	Risque (\$/an)	Risque cumulé (\$/an)	Pertes de vies potentielles	Bâtiments inondés
7 Allan's Corners	2	85475	14531	14531	4	3
	3	197858	45507	60038	4	3
	10	345452	17273	77311	8	6
	20	459659	18386	95697	8	7
	100	242947	2187	97884	17	11
	1000	1478172	1330	99214	24	13
	10000	1811244	181	99395	28	18
8 Embouchure Rivière des Anglais	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	3850	154	154	0	1
	100	7490	67	221	2	3
	1000	124440	112	333	13	19
	10000	714771	71	405	48	26
9 Embouchure Rivière des Fèves	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0
	100	860	8	8	0	1
	1000	56800	51	59	6	9
	10000	105737	11	69	19	13
10 Amont Barrage Ste-Martine	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	0	0
	1000	65150	59	59	2	6
	10000	200630	20	79	11	18

3.5 Le risque d'inondation estimé

Le risque global d'inondation est calculé par la sommation des produits de la probabilité annuelle de chaque événement et des dommages occasionnés par ces événements. Les dommages étant évalués en valeur monétaire, le risque est exprimé en dollars par année. Les dommages sont évalués à partir des rôles d'évaluation de 1996 : les coûts sont donc tous en dollars 1996.

Le tableau 3.7 contient à la quatrième et à la cinquième colonne l'estimation du risque associé à chaque événement de crue considéré et des risques cumulé et global. Ces résultats sont présentés pour chacun des dix sites définis sur la

rivière, et pour les différentes crues considérées dont les périodes de retour ont été évaluées comme étant de 2, 3, 10, 20, 100, 1000 et 10 000 ans. La figure 3.5 permet de comparer le montant du risque d'inondation sur chaque site. Cette figure met en évidence les différences d'ordre de grandeur du risque d'un site à l'autre.

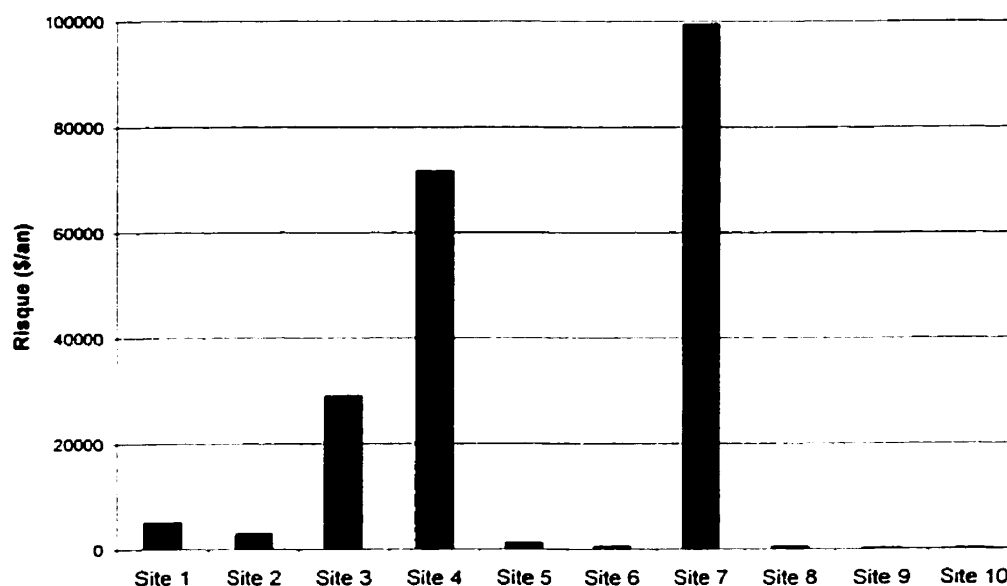


Figure 3.5 : Risque global d'inondation sur chaque site

Afin de procéder à l'analyse du risque d'inondation, il est intéressant de tracer les courbes du risque en fonction de la période de retour des crues. La figure 3.6 présente les courbes du risque associé à chaque crue simulée en fonction de la période de retour de cette crue. Ces courbes mettent en évidence le comportement du risque : la croissance maximale du risque se situe dans certains cas (sites 1, 3, 4, 5, 7 et 8) autour des crues moyennement fréquentes, c'est-à-dire les crues de 3 à 20 ans. Dans d'autres cas (sites 2, 6, 9 et 10), la

croissance maximale du risque s'effectue autour des crues plus rares (les crues de 100 ans et plus). La figure 3.7 présente les courbes du risque cumulé en fonction de la période de retour des crues.

Les quatre premières étapes de la méthodologie présentée au chapitre 2 ont été appliquées à la rivière Châteauguay. Ces étapes visaient à établir la distribution de probabilité des crues, à effectuer les simulations hydrauliques, à estimer les dommages d'inondation et à calculer le risque d'inondation. Le chapitre suivant vise à appliquer la cinquième étape de la méthodologie, soit l'analyse du risque calculé sur la rivière Châteauguay.

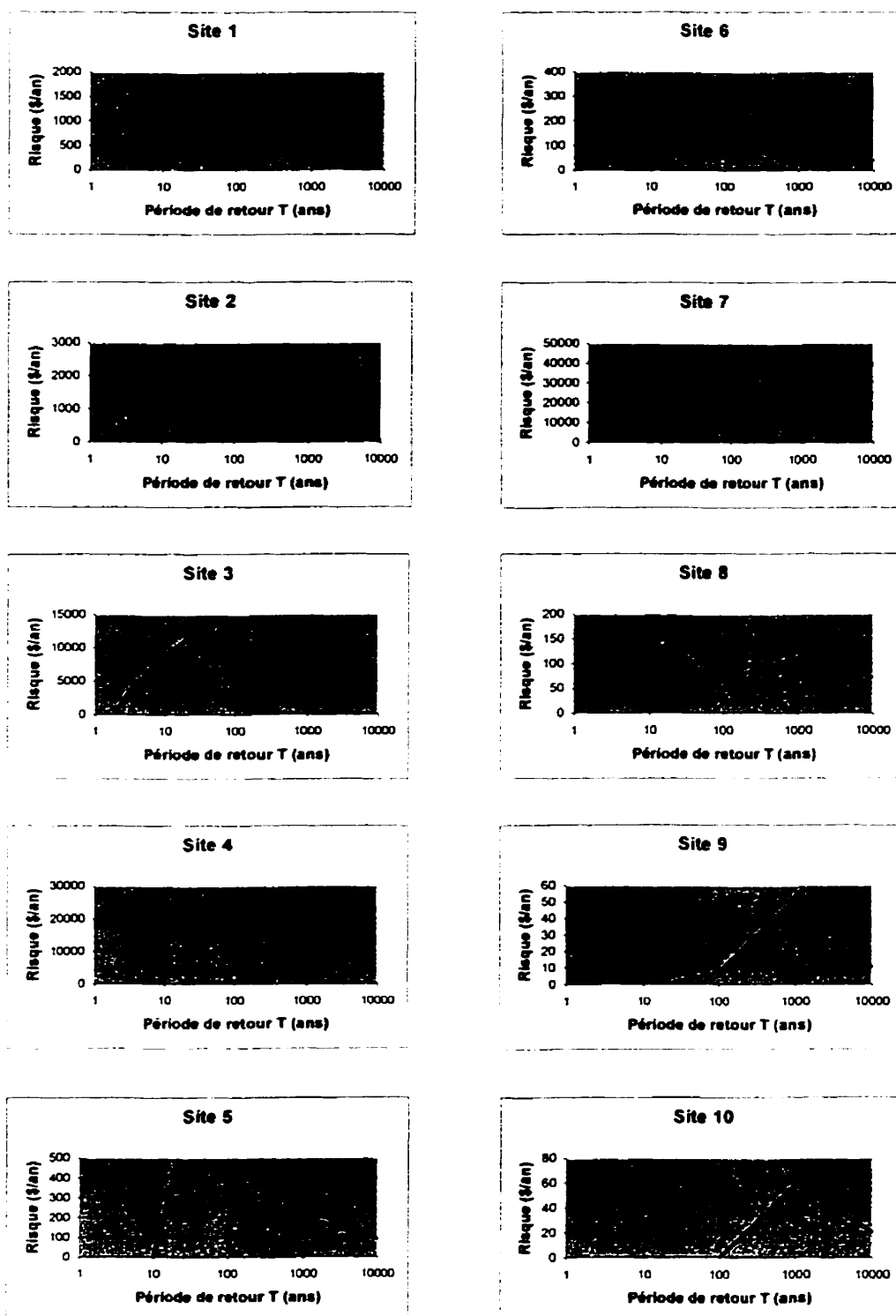


Figure 3.6 : Risque associé à chaque crue en fonction de la période de retour

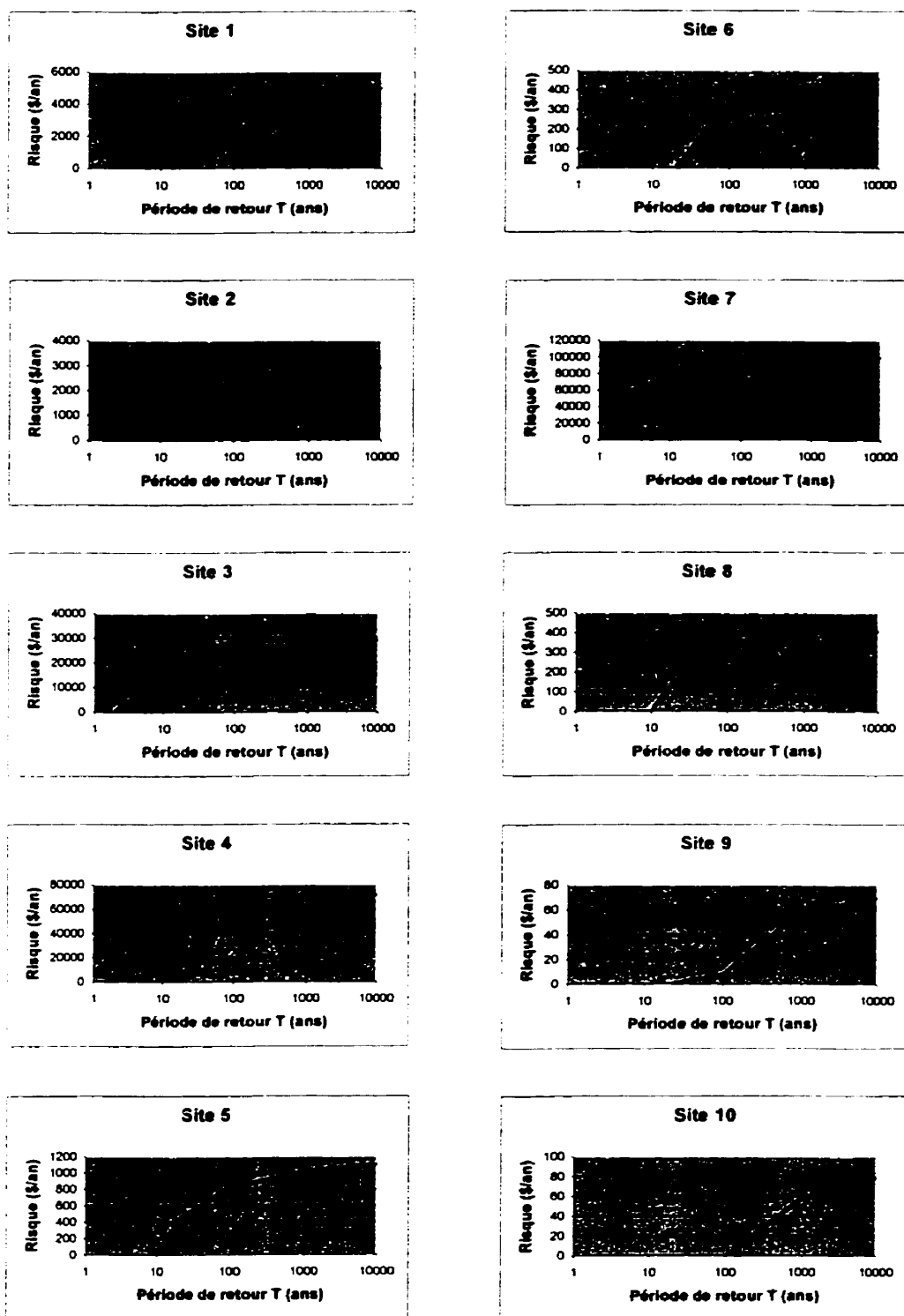


Figure 3.7 : Risque cumulé en fonction de la période de retour des crues

CHAPITRE 4

ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION SUR LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

4.1 Introduction

Au chapitre 3, les dommages et le risque d'inondation ont été évalués sur dix sites situés le long des berges de la rivière Châteauguay. L'analyse de ces résultats peut fournir des éléments de décision quant à la nécessité d'intervenir sur un site pour y réduire les impacts dus aux inondations. Il est également possible d'en déduire les crues sur lesquelles il faudrait agir ainsi que les montants des bénéfices résultant des interventions. L'analyse qui suit sert à proposer des pistes de décision pour intervenir sur les inondations.

Trois types d'impacts sont pris en compte. Les dommages potentiels calculés à partir du logiciel DOMINO sont les dommages directs occasionnés aux bâtiments et à leur contenu : ils servent donc à évaluer le risque de pertes économiques. L'utilisation de DOMINO a également permis d'estimer les pertes de vies potentielles, ce qui permet de tenir compte de l'aspect sécurité dans l'analyse du risque. Un troisième type de dommage sera considéré pour établir la nécessité d'intervenir sur les inondations : il s'agit des dommages indirects, qui sont en fait les divers inconvénients occasionnés à la population et ayant pour effet de réduire la qualité de vie.

4.2 Notion de risque acceptable

Un risque global d'inondation d'un montant donné n'aura pas le même impact selon qu'il est attribuable à des crues fréquentes ou à des crues plus rares.

Dans le premier cas, des dommages relativement faibles seront occasionnés souvent dans une période de temps relativement courte, soit 2 ans, 10 ans ou 20 ans. Dans le second cas, les dommages seront beaucoup plus importants, mais sont susceptibles de se produire beaucoup moins fréquemment, soit aux 100 ans ou aux 1000 ans. Chacun de ces cas affecte de façon différente la population sur le plan économique, sécuritaire et sur le plan de la qualité de vie.

Les intérêts principaux varient également à l'intérieur de la population. Le propriétaire d'une maison ou d'un commerce désirera éviter d'être inondé tout au long de la période durant laquelle il possédera son bâtiment. Il s'intéressera donc au risque sur un horizon limité, soit de 10 ans, de 20 ans ou de plus, tout dépendant des caractéristiques et du développement économique de la région. Les autorités municipales ou les gouvernements auront une vision du risque à plus long terme, pouvant correspondre à la durée de vie complète des bâtiments et des infrastructures. Ils voudront également éviter des inondations fréquentes affectant le transport et les services municipaux. Ils pourront également considérer les crues extrêmes, dans l'éventualité où celles-ci représenteraient une menace pour la vie des citoyens.

Cet horizon de temps sur lequel on s'intéresse au risque constitue la limite du risque acceptable. Donc au-delà de cette limite, les impacts potentiels ne seront pas considérés. La valeur du risque à utiliser lors de l'exploitation des résultats devient alors le risque cumulé pour la crue dont la fréquence correspond à l'horizon de temps auquel on s'intéresse.

Par contre la limite du risque non acceptable est susceptible de changer selon qu'il s'agisse des pertes économiques, des pertes de vies ou de la diminution de la qualité de vie.

4.3 Analyse des impacts et du risque non acceptable

4.3.1 Risque de pertes économiques

Trois limites de risque non acceptable sont considérées, soit : le risque attribuable aux crues de période de retour de 10 ans ou moins, de 20 ans ou moins et de 100 ans ou moins. Le choix de la limite non acceptable dépendra des objectifs visés par les interventions. Le tableau 4.1 résume les risques de pertes économiques calculés pour chaque limite de risque non acceptable. Le montant de ces risques correspond au risque cumulé à la période de retour de crue constituant cette limite.

On observe au tableau 4.1 qu'il existe effectivement un risque non acceptable, c'est-à-dire que le risque cumulé n'est pas nul, sur plusieurs sites.

Tableau 4.1 : Risque économique non acceptable

Site	Risque cumulé 10 ans (\$/an)	Risque cumulé 20 ans (\$/an)	Risque cumulé 100 ans (\$/an)
1	2866	4224	4852
2	162	654	2574
3	12803	23993	28418
4	43986	65445	70610
5	0	439	817
6	0	0	334
7	77311	95697	97884
8	0	154	221
9	0	0	8
10	0	0	0

4.3.2 Pertes de vies potentielles

Les pertes de vies potentielles sont évaluées en nombre de personnes. Encore une fois, le choix de la fréquence de crue constituant la limite non acceptable dépendra de la protection que la population veut bien s'assurer. Cependant il est fort probable que cette limite soit plus élevée que la limite établie pour le risque de pertes économiques. Le tableau 4.2 compile les pertes de vies potentielles associées aux crues de 20 ans, 100 ans et 1000 ans. Pour des crues aussi faibles que 20 ans, il existe un risque sur quelques sites, et pour la crue millénaire, il existe un risque sur tous les sites étudiés.

Tableau 4.2 : Pertes de vies potentielles

Site	Limite crue 20 ans	Limite crue 100 ans	Limite crue 1000 ans
1	4	11	17
2	0	2	2
3	33	50	57
4	15	19	26
5	0	2	15
6	0	0	11
7	8	17	24
8	0	2	13
9	0	0	6
10	0	0	2

4.3.3 Dommages indirects

Des inondations fréquentes peuvent constituer une nuisance pour la population, qu'elles occasionnent des dommages directs ou non. Dans le cas où ces inondations ne causent pas de dommages directs, leurs impacts ne sont pas

considérés dans l'évaluation du risque d'inondation telle que réalisée au chapitre 3.

Par contre l'occurrence des dommages directs peut donner une indication sur celle des dommages indirects. Ainsi, si une grande proportion des dommages directs survient pour de faibles crues, les dommages indirects sont également occasionnés fréquemment. Les dommages indirects peuvent inclure l'inondation des routes, des parcs, des champs cultivés, mais aussi l'inondation des bâtiments, qui est mesurée par les dommages directs. Une trop grande fréquence d'occurrence des dommages indirects peut être considérée inacceptable.

Il devient donc nécessaire d'établir quelle est la fréquence de crue constituant la limite, et quelle est la proportion des crues acceptable sous cette limite. Par exemple, un critère pourrait établir que les dommages indirects ne sont pas acceptables si 50 % du risque d'inondation est attribuable aux crues de 10 ans et moins.

Le tableau 3.7 et les courbes du risque cumulé en fonction de la crue, à la figure 3.7, permettent d'observer la proportion des dommages occasionnés par de faibles crues.

Afin d'analyser les dommages indirects sur la rivière Châteauguay, la crue constituant la limite est fixée à 3 ans et à 10 ans. Le rapport entre le risque cumulé pour la crue de 3 ou 10 ans et celle de 1000 ans servira à calculer la proportion du risque de pertes économiques sous cette limite. Le tableau 4.3 contient la proportion des dommages fréquents pour des limites de 3 et 10 ans. On y observe la tendance des dommages, sur les sites 1, 3, 4 et 7, à croître

rapidement pour des crues modérées. Les inondations sont probablement, sur ces sites, une nuisance.

Tableau 4.3 : Proportion des dommages fréquents

Site	Risque cumulé 3 ans/ risque cumulé 1000 ans (%)	Risque cumulé 10 ans/ risque cumulé 1000 ans (%)
1	24	58
2	5	6
3	14	44
4	29	62
5	0	0
6	0	0
7	61	78
8	0	0
9	0	0
10	0	0

4.4 Interventions rentables et bénéfiques possibles

La notion de risque non acceptable peut permettre d'identifier les sites où il est nécessaire d'intervenir pour réduire les impacts des inondations. L'analyse du risque peut également permettre de choisir le type d'intervention le plus rentable et d'en estimer les bénéfices.

La façon dont la croissance du risque progresse en fonction de l'amplitude des crues, illustrée aux figures 3.6 et 3.7 (section 3.5), fournit immédiatement une indication sur l'intervalle des crues sur lesquelles il sera plus rentable d'intervenir pour minimiser ce risque.

Un taux d'accroissement élevé du risque signifie une forte augmentation des dommages pour une faible augmentation du débit. Dans ces cas, une intervention diminuant faiblement le débit (où l'élévation maximale du plan d'eau) signifie une forte diminution des dommages. On suppose donc que pour les intervalles de débits où le taux de croissance du risque est positif, les bénéfices seront plus grands pour un investissement minimum dans la protection contre les inondations.

Les bénéfices économiques annuels pouvant être obtenus par une intervention pour réduire le risque d'inondation sont donnés directement par le montant de la diminution du risque. Ainsi, il est facile d'obtenir un ordre de grandeur du montant pouvant être investi pour que le projet demeure rentable. Selon le montant du risque, il est également possible d'estimer l'échelle de protection adéquate.

4.5 Facteurs influençant le risque estimé

4.5.1 Facteurs d'incertitude

La portée des valeurs estimées au chapitre 3 doit être tenue en compte lors de l'exploitation des résultats. Il est également essentiel d'être conscient qu'à chaque étape du processus d'évaluation du risque d'inondation, un certain nombre d'hypothèses et d'incertitudes liées aux données utilisées s'ajoutent à la valeur estimée.

L'estimation des débits des diverses crues est une source d'incertitude importante. Le calcul de la distribution de fréquence des crues est basé sur une analyse statistique de débits mesurés sur une période de durée limitée.

Dans le cas de la rivière Châteauguay, l'analyse a été réalisée à partir d'une série de débits maximums annuels s'étalant sur 70 ans. Les débits estimés des crues centenaires, millénaires et même décamillénaires sont extrapolés de cet échantillon. De plus, la station de mesure des débits d'où provient cet échantillon se situe en aval du bassin versant, donc on doit poser des hypothèses pour déduire les apports de tous les affluents de la rivière Châteauguay. Les hypothèses posées sur la répartition des débits ont une influence directe sur les débits estimés au niveau des sites situés plus en amont.

La simulation hydraulique du passage des crues dans la rivière Châteauguay a également nécessité d'estimer plusieurs paramètres inconnus. Ces hypothèses concernent principalement les sections de contrôle, la bathymétrie et la rugosité des surfaces d'écoulement. Pour compenser ces incertitudes, le modèle a été calibré, mais un nombre limité de données sont disponibles pour réaliser cette calibration. De plus, le modèle numérique utilisé permet un niveau de précision limité, par exemple dans la description des sections d'écoulement et dans le nombre de sections d'écoulement pouvant être considérées. De plus, les simulations avec le modèle DAMBRK reposent sur l'hypothèse que les écoulements sont unidimensionnels, ce qui peut générer des erreurs significatives, surtout en présence de plaines inondées.

L'estimation des dommages dus aux inondations permet d'obtenir un degré de précision limité, certaines données de bases étant approximatives ou tout simplement inconnues. Les modèles numériques de terrain calculés par DOMINO ne sont pas exacts, et leur précision est fonction de la quantité d'informations topographiques disponibles et de la complexité du relief de la zone modélisée. Comme mentionné précédemment lors de l'application de DOMINO à la rivière Châteauguay, la position exacte des bâtiments sur le

terrain peut être difficile à obtenir. Une erreur sur la position du bâtiment est susceptible de générer une erreur sur la profondeur d'eau l'affectant, et ainsi sur les dommages occasionnés. Le coût des dommages à chaque bâtiment est estimé par une relation du pourcentage de perte de la valeur du bâtiment en fonction de la profondeur d'eau entourant le bâtiment. Cette relation est générale et ne tient pas compte des caractéristiques propres à chaque bâtiment. La valeur du bâtiment est fournie par le rôle d'évaluation, qui ne correspond pas nécessairement à sa valeur de remplacement en cas de perte, les rôles d'évaluation n'étant pas mis à jour régulièrement. Les dommages au contenu sont exprimés en terme de pourcentage de la valeur du bâtiment, et ne tiennent donc pas compte des contenus particuliers de chaque maison et de leur disposition.

Finalement, le risque évalué tient compte uniquement des unités d'évaluations inscrites aux rôles d'évaluation, les autres types de dommages étant négligés.

4.5.2 Représentativité des sites

Les dix sites sur lesquels le risque d'inondation a été évalué ne sont que des parcelles de territoire. Les risques estimés ne sont donc pas des valeurs absolues pouvant caractériser le risque dans un secteur. Ces valeurs ne peuvent s'appliquer que pour le territoire compris dans les limites du site.

L'exploitation du risque calculé est cependant susceptible de faire appel à des données couvrant des territoires plus grands que ceux couverts par les sites. Par exemple, si une municipalité désire mettre sur pied des mesures de minimisation des impacts dus aux inondations, elle sera intéressée à connaître

les dommages potentiels moyens annuels sur l'ensemble du territoire de la municipalité.

Par contre, l'extrapolation du risque d'inondation à l'extérieur des limites du site serait possible uniquement si le site sur lequel le risque a été calculé était représentatif de l'ensemble du territoire sur lequel on voudrait extrapoler. Plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer le niveau de risque estimé sur un site. Pour extrapoler ou comparer les résultats obtenus d'un site à l'autre, ces facteurs devraient être constants.

Parmi ces facteurs susceptibles d'influencer le niveau de risque sur un site, il y a d'abord la dimension et l'orientation du site. Le risque est calculé à partir des dommages estimés sur un territoire délimité, soit le site. Or ce site peut varier en forme, en orientation par rapport au cours d'eau et en superficie. L'orientation du site par rapport au cours d'eau a une influence considérable sur le risque estimé. En général, le risque est plus élevé près des berges et diminue lorsqu'on s'en éloigne. L'orientation du site permet d'inclure une certaine longueur de berge, influençant ainsi le niveau de risque du site. Il est donc impossible de calculer un risque par unité de surface sans considérer la longueur de berge incluse dans le site.

La localisation du site influence également de façon directe le risque évalué. La répartition de la population sur un territoire étendu a peu de chance d'être uniforme. La densité de bâtiments construits le long d'un cours d'eau varie beaucoup, passant de zones urbaines à zones rurales. Selon sa position, le site peut inclure plus ou moins de bâtiments. La répartition des bâtiments à l'intérieur d'un site peut aussi être très inégale. Par exemple, dans certaines zones rurales, les bâtiments seront concentrés le long de la rivière.

La topographie du terrain est également à considérer. La configuration générale du relief aura une influence sur le risque. Des berges profondes ont de meilleures chances de contenir la crue, et des bâtiments construits beaucoup plus haut que la rivière auront moins de chance d'être affectés.

L'emplacement des bâtiments dans la plaine inondable influence directement le risque calculé pour le site. Dans certaines zones, les bâtiments inondés seront situés principalement dans la plaine inondée aux 3 ans, alors que plus loin ils seront plutôt affectés par la crue centenaire. Donc, si l'on effectue des comparaisons du risque d'un site à un autre, pour un risque global dont le montant est équivalent pour deux sites, les mécanismes d'inondations causant ces dommages peuvent être très différents. Par exemple, un risque global de 10 000 \$/an peut être attribuable à des dommages de 10 000 \$ causés chaque année par la crue printanière. Il peut aussi être attribuable au risque de subir des dommages de plusieurs millions de dollars au passage de la crue millénaire. Dans le premier cas, le risque de 10 000 \$/an pourrait être considéré comme étant inacceptable, car il occasionne des coûts à chaque année, alors que dans le second cas, on pourrait choisir de ne pas en tenir compte étant donnée sa faible probabilité d'occurrence.

Bref, plusieurs caractéristiques du territoire doivent être homogènes afin de pouvoir transposer des valeurs du risque estimées d'un site à un plus grand territoire. On conclut donc que pour obtenir une bonne estimation du risque sur un territoire, il faudrait couvrir par des sites d'étude toutes les zones sujettes aux inondations comprises sur le territoire. L'étendue de ces zones peut varier, selon la configuration de la plaine d'inondation de la crue maximale considérée dans l'étude.

4.5.3 Propriétés individuelles

Le risque évalué sur un site est une valeur moyenne pour l'ensemble du site, et non le risque caractérisant chaque bâtiment s'y trouvant. Si le risque d'inondation était évalué individuellement pour chaque bâtiment compris à l'intérieur des limites d'un site, il pourrait y avoir de fortes variations d'un bâtiment à l'autre. Il est évident qu'entre deux bâtiments de valeur équivalente, celui situé dans la plaine inondable aux 2 ans aura un risque plus élevé que celui inondé aux 100 ans. Cela a pour conséquence que les bâtiments situés sur un site à faible densité de population, et dont le risque total est faible, sont susceptibles de présenter un risque individuel plus élevé que ceux situés sur un site où la densité est élevée et le risque total élevé.

L'évaluation du risque global d'un site ne fournit donc pas d'indication sur le risque des propriétés individuelles. Il faudra en tenir compte lors du choix des méthodes de réduction du risque et des dommages, et décider de l'échelle de la protection requise. Les différentes méthodes auront une action sur la propriété individuelle, sur l'ensemble du site ou sur le bassin versant en entier.

CHAPITRE 5

MINIMISATION DES IMPACTS SUR LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

5.1 *Inventaire des moyens d'intervention*

Les mesures de minimisation des impacts des inondations peuvent prendre différentes formes, selon l'amplitude et le volume de la crue de projet, i.e. de la crue contre laquelle on veut se prémunir. Le choix de l'intervention se fera aussi en fonction des caractéristiques topographiques et de l'occupation du territoire à protéger, du montant pouvant être investi, des bénéfices en résultant et de l'échelle à laquelle la protection devra s'appliquer.

Les mesures de minimisation peuvent intervenir à trois échelles différentes, soit sur des bâtiments individuels, sur un site ou un tronçon de rivière en particulier ou sur une portion ou l'ensemble du bassin versant.

La protection individuelle des bâtiments peut être assurée par les moyens suivants :

- le déplacement du bâtiment;
- l'imperméabilisation du bâtiment pour augmenter la cote à laquelle l'eau y entre;
- la construction de digues permanentes ou temporaires autour du bâtiment;
- l'aménagement intérieur conçu pour limiter les dommages : par exemple, en n'aménageant pas le sous-sol, ou en faisant l'entreposage au grenier.

Pour la protection d'un site, on identifie les interventions suivantes :

- la diminution de la crue maximale en un point par la modification des relations débits / niveau des ouvrages existants;
- la construction de digues ou de murs le long du cours d'eau ou autour d'une zone à protéger;
- la modification ponctuelle du lit du cours d'eau pour en abaisser le niveau lors des crues : diminuer la résistance, modifier la section du lit du cours d'eau, abaisser le fond du cours d'eau, éliminer courbes et méandres;
- la dérivation d'une partie des eaux par un canal.

Finalement une protection étendue sur le bassin versant peut être assurée par les mesures suivantes :

- diminuer l'amplitude maximale de la crue sur une partie du cours d'eau par la construction de réservoirs,
- gérer l'occupation des plaines inondables;
- mettre sur pied un système de surveillance de la rivière pour alerter et évacuer les zones menacées par des inondations;
- réduire le ruissellement par la gestion des terres et du territoire.

Le choix de l'échelle de protection requise se fera par l'étude des mécanismes d'inondation, de l'étendue des dommages et du niveau de risque.

5.2 Critères d'intervention sur la rivière Châteauguay

5.2.1 Les types de critères

Au chapitre 4, l'analyse du risque calculé sur dix sites de la rivière Châteauguay a permis de mettre en évidence l'existence de risques inacceptables, d'observer la façon dont le risque croît sur chaque site en fonction de l'amplitude des crues et d'estimer les bénéfices potentiels d'une intervention. La prochaine étape vise à décider, à partir de ces données, si des interventions seront faites sur chacun des sites. Cette décision sera prise en considérant quatre aspects : les pertes économiques, la réglementation dans les plaines inondables, les dommages indirects et les pertes de vies potentielles. Pour chacun de ces aspects des critères de décision précis seront établis, en fonction des limites du risque acceptable.

5.2.2 Les pertes économiques

La rivière Châteauguay connaît régulièrement de fortes crues et elle a souvent causé des dommages importants lors de ses débordements. Ces inondations occasionnent des pertes financières aux citoyens, aux entreprises, aux assureurs et aux gouvernements, ainsi que de nombreux inconvénients.

Au Québec, le gouvernement provincial a la charge de dédommager les particuliers et les entreprises ayant subis des pertes suite à une inondation. Cependant il n'est pas improbable que dans un avenir plus ou moins rapproché, ce fardeau économique soit remis aux municipalités. Il devient donc intéressant, autant pour les autorités municipales que provinciales, de connaître les dommages annuels potentiels. Dans le cas où les municipalités devraient

assumer tous les coûts des inondations survenant sur leur territoire, les dommages potentiels annuels pourraient être absorbés par une augmentation des taxes municipales.

Certaines interventions sur le territoire pourraient par contre permettre de minimiser les pertes économiques causées par les inondations. La mise sur pied de mesures de minimisation des impacts nécessite évidemment certains investissements, dont le montant dépend du type d'intervention qui sera utilisé. La construction de digues ou d'ouvrages de retenue peut s'avérer très coûteuse, alors que l'imperméabilisation de quelques bâtiments peut être beaucoup moins cher. L'évaluation des dommages dus aux inondations et du risque fournit les données de base nécessaires au choix des investissements en permettant d'en calculer les bénéfices.

La rentabilité des investissements peut être estimée en comparant les montants à investir et les économies réalisées sur une période de temps donnée, l'horizon économique. Les économies pouvant être estimées dans cette étude sont celles découlant de la réduction des dommages directs. Évidemment il existe d'autres types de bénéfices possibles, mais dont les montants ne peuvent être estimés.

La fréquence des crues de la rivière Châteauguay causant des dommages laisse croire qu'il pourrait être avantageux économiquement d'intervenir sur ce cours d'eau. Cependant il faut établir des critères économiques afin de justifier les interventions.

Posons l'hypothèse selon laquelle les autorités voudraient réaliser des économies en intervenant dans la plaine inondable pour la crue de 20 ans

sur la rivière Châteauguay. L'horizon économique à considérer pour l'analyse de rentabilité est de 20 ans.

La décision d'intervenir, le choix du type d'intervention et le choix de la crue de projet se feront en comparant les bénéfices réalisables sur 20 ans et le montant de l'investissement requis. Les bénéfices annuels des 20 prochaines années sont ramenés en valeur actuelle, soit en \$ 1996, avec un taux d'actualisation fixé (de façon arbitraire) à 5%. Le facteur d'actualisation est donc, pour 20 ans, de 12,4622.

5.2.3 La réglementation

L'intervention sur un site pourrait également viser à se conformer à une réglementation sur l'occupation des plaines inondables. Une politique de gestion des plaines inondables pourrait viser à empêcher la croissance du risque inacceptable et mener à des interventions sur le terrain afin de réduire au minimum le risque non acceptable existant.

Actuellement, au Québec, il n'existe pas de lois provinciales réglementant réellement l'utilisation du territoire dans les plaines inondables. Les cartes du risque d'inondation ont été tracées pour plusieurs zones habitées de la province. Cependant la gestion de l'occupation des plaines inondables demeure la responsabilité des municipalités.

Ces considérations sur la réglementation pourront également servir de base à l'établissement des critères d'intervention.

Posons l'hypothèse selon laquelle une réglementation impose l'élimination du risque de pertes économiques attribuables à la crue de 20 ans.

Donc, selon ce critère, dès que le risque cumulé de la crue de 20 ans n'est pas nul sur un site, une intervention est requise. Ce critère recoupe donc le critère économique, et impose des interventions, qu'elles soient rentables ou non, dans la plaine inondable aux 20 ans.

5.2.4 Les dommages indirects

Des inondations fréquentes peuvent constituer une nuisance importante pour la population touchée.

La rivière Châteauguay, en certains endroits, sort de son lit presque tous les printemps. Même si elle cause peu de dommages directs aux bâtiments, elle n'en cause pas moins des inconvénients en perturbant la circulation et en inondant les champs et les parcs.

Au paragraphe 4.3.3, il est proposé d'évaluer les dommages indirects en se basant sur les dommages directs aux bâtiments. Mais l'approche utilisée d'estimation des dommages dus aux inondations ne permet pas d'estimer les dommages indirects aux endroits où aucun dommage direct n'a été calculé. Pour les sites étudiés sur la rivière Châteauguay, un critère d'intervention basé sur cette approche est fixé.

Posons l'hypothèse selon laquelle la population établit qu'il est inacceptable que le rapport du risque cumulé de la crue de 3 ans sur le risque cumulé de la crue de 1000 ans dépasse 20 %.

Ainsi, si une trop grande proportion du risque est attribuable à des crues fréquentes, une intervention est jugée nécessaire.

5.2.5 Les pertes de vies potentielles

Un contrôle des inondations peut aussi être requis lorsqu'elles représentent un danger pour la population. Il devient difficile et même impossible de calculer les bénéfices économiques d'un projet visant à diminuer les pertes de vies potentielles. Il est également difficile d'établir la limite du risque acceptable pour ce type d'impacts. Le choix de cette limite est parfaitement arbitraire et suivra les exigences de la population. Les pertes de vies potentielles sont d'ailleurs évaluées de façon beaucoup plus arbitraire que le risque économique.

Posons l'hypothèse selon laquelle la population du bassin de la rivière Châteauguay désire réduire les pertes de vies potentielles dans la plaine d'inondation de la crue centennale.

La limite du risque acceptable pour les pertes de vies potentielle est donc la crue de 100 ans.

5.2.6 Résumé des critères de justification des interventions

Dans les paragraphes précédents, il a été conclu que les interventions devraient être effectuées sur des sites : où les investissements seront rentables sur un horizon économique défini, où ils permettront de diminuer le risque pour se

conformer à une réglementation ou encore aux endroits où le nombre de pertes de vies potentielles et les dommages indirects sont jugés inacceptables.

Suivant ces objectifs, les critères établis pour justifier les interventions sur le tronçon étudié de la rivière Châteauguay sont:

- l'élimination du risque économique non acceptable, dont la limite est fixée à la crue de période de retour de 20 ans;
- un rapport du risque cumulé de la crue 3 ans / crue 1000 ans supérieur à 20 %;
- la réduction des pertes de vies potentielles dans la plaine d'inondation de la crue centennale.

5.3 Identification des sites pour la réduction des impacts

La zone traitée dans cette étude couvre uniquement un tronçon de la rivière Châteauguay, allant de la frontière des États-Unis au barrage de Sainte-Martine. De plus, sur ce tronçon, seulement dix sites sont étudiés. On ne possède donc pas une image d'ensemble de la répartition du risque sur la rivière, mais plutôt des données ponctuelles. Pour tenir compte de cette limitation, l'emplacement des sites a été choisi de manière à couvrir les zones les plus densément habitées et les plus fréquemment affectées par les inondations, donc où le risque est plus élevé.

Le tableau 5.1 résume les résultats obtenus à la section 4, sélectionnés suivant les critères de justification d'interventions mentionnés à la section précédente, ainsi que les économies réalisables sur 20 ans.

Tableau 5.1 : Risque selon les critères de justification des interventions

Site	Emplacement	Risque non acceptable (\$/an)	Économies réalisables sur 20 ans (\$ 1996)	Risque cumulé 3 ans/ 1000 ans (%)	Pertes de vies potentielles par la crue de 100 ans
1	Hinchinbrooke	4224	52 640	24	11
2	Huntingdon	654	8150	5	2
3	Huntingdon	23 993	299 006	14	50
4	Dewittville	65 445	815 589	29	19
5	Ormstown	439	5471	0	2
6	Ormstown	0	0	0	0
7	Allan's Corners	95 697	1 192 595	61	17
8	St-Paul	154	1919	0	2
9	St-Paul	0	0	0	0
10	Ste-Martine	0	0	0	0

Il existe un risque économique non acceptable aux sites 1, 2, 3, 4, 5, 7, et 8. Ce risque varie de 154 \$/an à 95 697 \$/an et il est particulièrement élevé aux sites 3, 4, et 7. Des interventions sont alors nécessaires pour éliminer ce risque. Au site 3, le nombre de pertes de vies potentielles atteint 50 personnes, et près de 20 aux sites 4 et 7, ce qui démontre que les crues ont un impact considérable à ces endroits. De plus, la proportion des dommages fréquents, sur ces trois sites, dépasse la limite établie des 20 %. Pour ces sites, des montants s'élevant entre 299 000 \$ et 1 193 000 \$ pourraient être investis, tout en conservant un projet rentable. Les sites 1 et 2 présentent un risque non acceptable dont le montant annuel est cependant plus bas. Dans le cas de ces sites, des bénéfices sont plus difficilement réalisables (les coûts des interventions devraient se limiter à 52 640 \$ et 8150 \$), mais des interventions sont requises pour éliminer le risque économique et réduire les pertes de vies potentielles. Les sites 5 et 8 présentent également un risque non acceptable, mais les dommages n'affectent qu'un seul bâtiment à chacun de ces endroits. On peut déjà supposer qu'une intervention visant ces bâtiments de façon

individuelle aurait des chances d'être plus avantageuse sur le plan économique. Les sites 6, 9 et 10 ne nécessitent pas d'intervention selon les critères établis.

En résumé, des interventions seraient justifiées aux sites 1, 2, 3, 4, 5, 7, et 8. Cependant, aucune intervention ne sera proposée pour les sites 1 (Hinchinbrooke), 4 (Dewittville) et 7 (Allan's Corners) car la validité du risque calculé à ces endroits est mise en doute.

Des méthodes de réduction des impacts doivent être appliquées sur un site en considérant que des interventions sur le cours d'eau peuvent avoir des impacts, positifs ou négatifs, sur des secteurs situés en dehors du site. Ainsi, il peut être avantageux d'utiliser des méthodes intervenant sur plusieurs sites à la fois.

La section suivante vise à proposer des interventions pour minimiser le risque de façon à optimiser l'efficacité et la rentabilité des investissements. Le choix des interventions est réalisé en tenant compte des mécanismes d'inondation et du risque identifié sur chacun des sites visés (2, 3, 5 et 8).

5.4 Mécanismes d'inondation et interventions proposées

5.4.1 Site 2

5.4.1.1 Mécanismes d'inondation

La figure 5.1 présente un plan de la région entourant la ville de Huntingdon. Le site 2 est situé dans la ville de Huntingdon, immédiatement en amont du site 3.

Le site 2 se trouve en zone urbaine, où la densité de population est relativement élevée. Le graphique du risque cumulé au site 2 (figure 3.7) montre que le risque calculé sur ce site reste relativement faible pour des crues de récurrence de 10 ans et moins, puis croît rapidement pour les crues de fréquence d'occurrence de 20 jusqu'à 100 ans, et augmente peu avec les crues supérieures à la crue centennale.

Les simulations effectuées sur le site 2, à l'aide des logiciels DAMBRK et DOMINO, ont démontré que le lit mineur de la rivière et sa plaine de débordement peuvent contenir les crues de 10 ans et moins. Par contre au-delà de la cote atteinte par la crue de 20 ans, l'eau commence à inonder les terrains construits (figure 5.2). D'ailleurs, le nombre de bâtiments touchés passe de 3, lors du passage de la crue de 20 ans, à 15 lors de la crue de 100 ans (figures 5.2 et 5.3). Les crues de période de récurrence supérieure à 100 ans (figure 5.4) causent également des dommages croissants, mais le risque croît peu car, le coût des dommages annuels est pondéré par une probabilité d'occurrence de la crue de plus en plus faible.

La montée du niveau du plan d'eau en amont de Huntingdon, en zone rurale, contribue à faire augmenter le débit contournant la ville par la décharge Schyler. Cette décharge opère un fossé de drainage situé dans la partie est de la ville à environ 400 mètres de la rivière Châteauguay, et parallèle à celle-ci (voir figure 5.1). La décharge semble dévier une portion des eaux affluant vers la ville de Huntingdon, en provenance des terres qui s'étendent plus en amont et de la plaine de débordement de la rivière, pour les rejeter en aval de la ville. Ainsi la décharge aurait pour effet d'atténuer la pointe de la crue traversant Huntingdon, et de façon plus marquée pour des crues de fréquences d'occurrence d'environ 100 ans et plus.

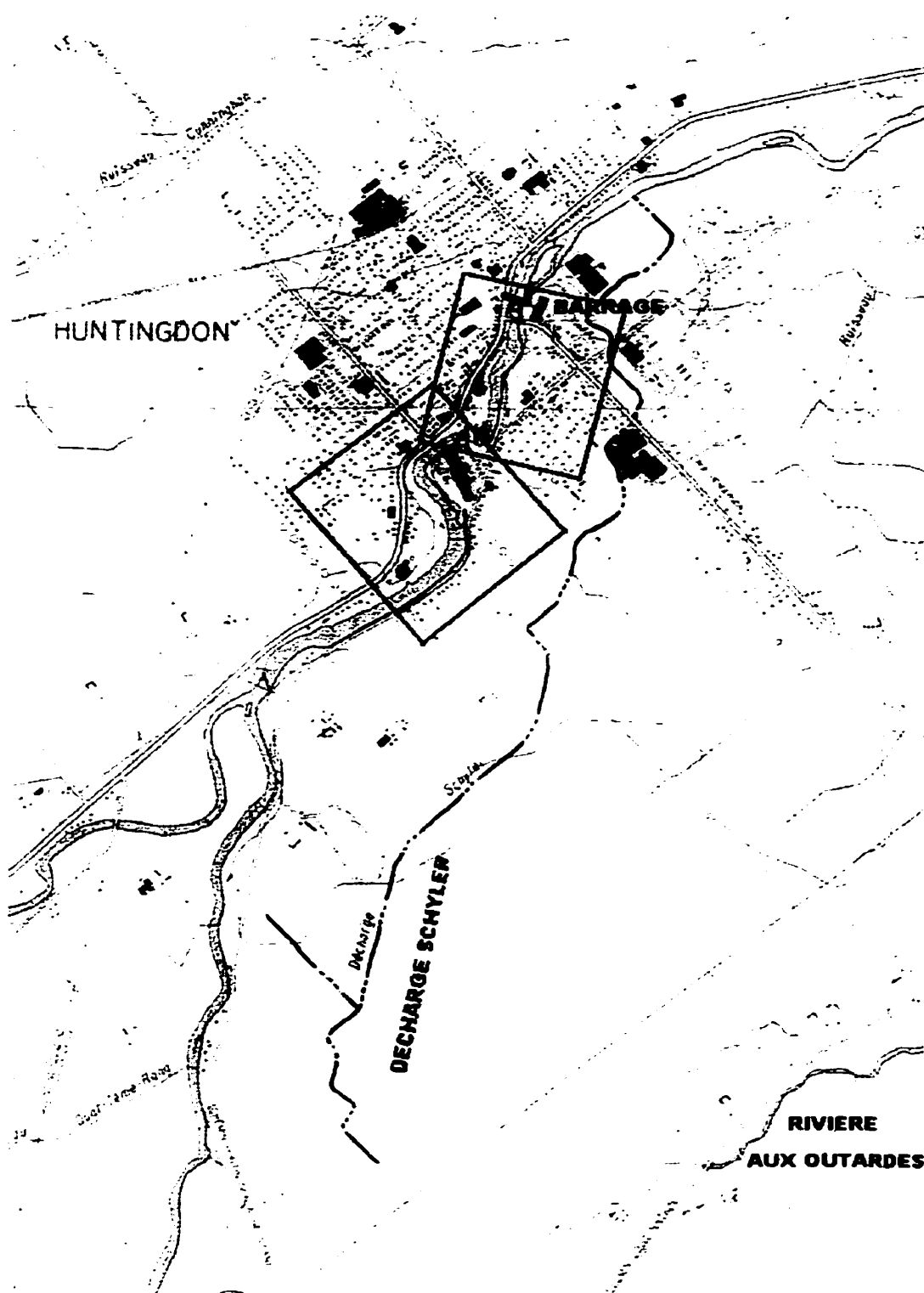


Figure 5.1 : Plan de la région de Huntingdon

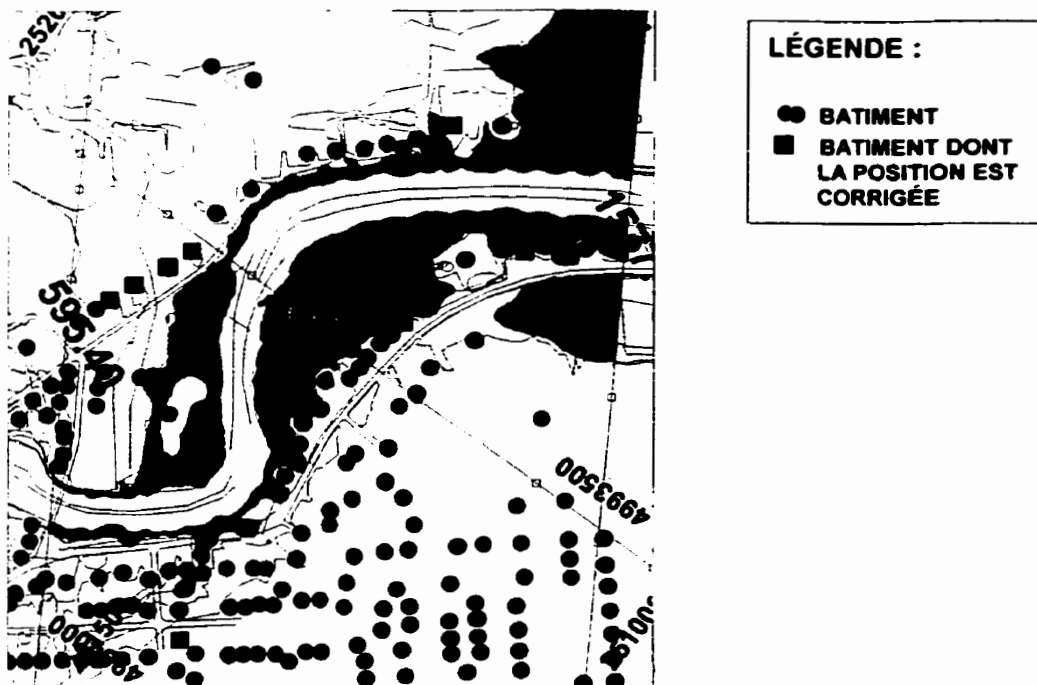


Figure 5.2 : Inondation par la crue de 20 ans au site 2

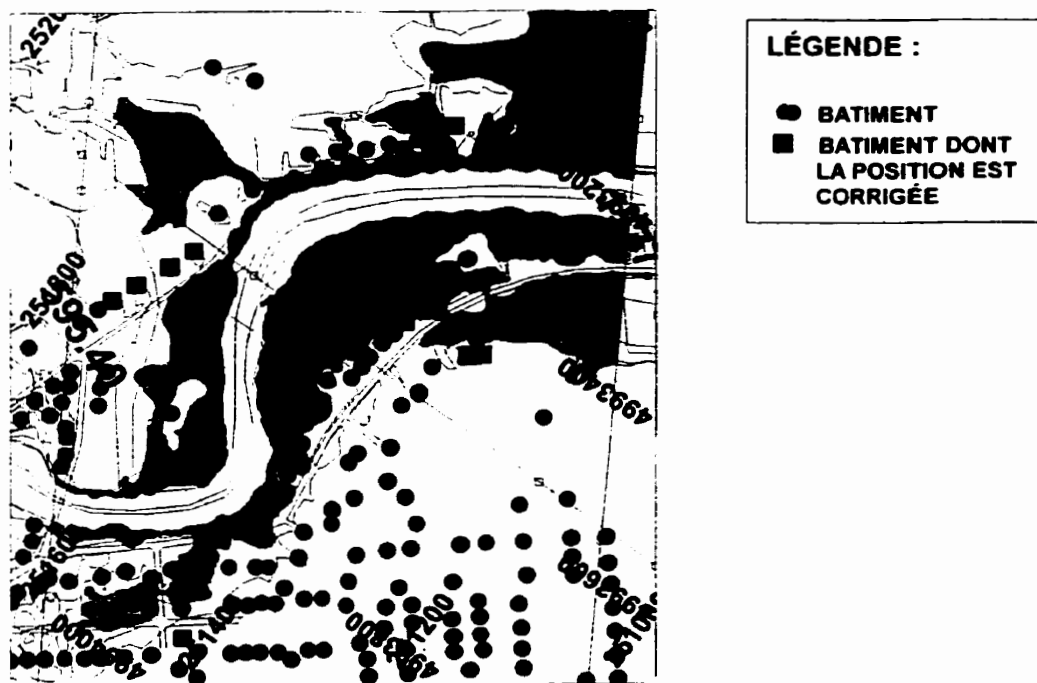


Figure 5.3 : Inondation par la crue de 100 ans au site 2

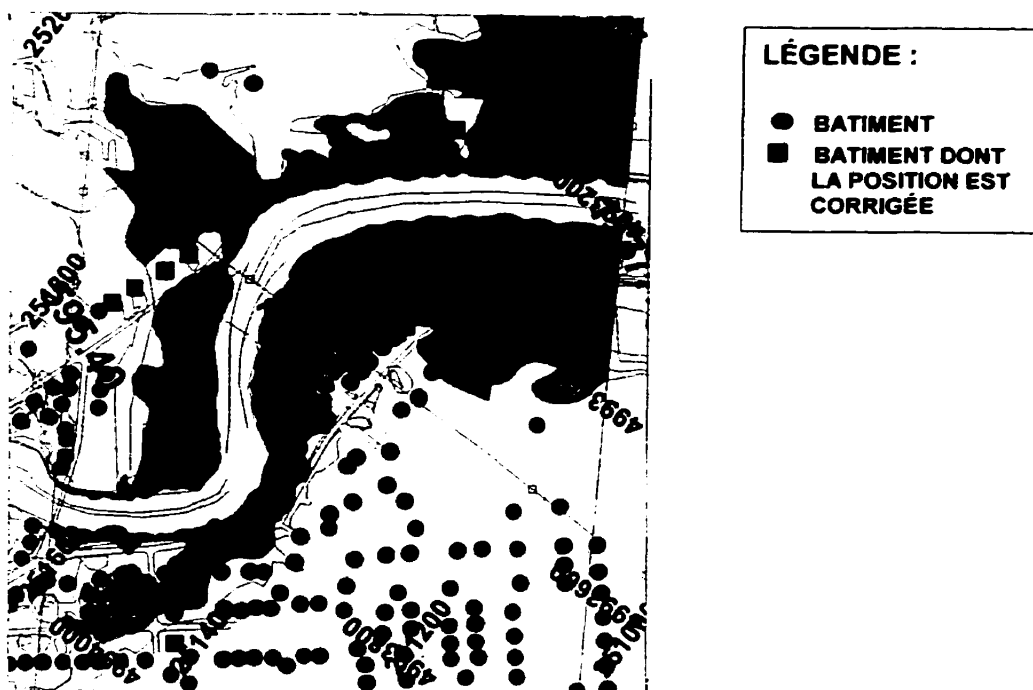


Figure 5.4 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 2

5.4.1.2 Interventions proposées

Seulement trois bâtiments sont affectés par la crue de 20 ans, ce qui laisse penser que des méthodes de protection individuelle pourraient être avantageuses. Cependant, il serait possible d'intervenir à la fois sur le site 2 et le site 3 situé immédiatement en aval. La modification du barrage de Huntingdon, se trouvant à l'extrémité aval de site 3 (voir figure 5.1) ou la dérivation des eaux par la décharge Schyler pourraient abaisser le niveau d'eau maximal atteint lors du passage des crues aux sites 2 et 3 et ainsi y réduire le risque. Ces interventions permettraient de réduire les pertes de vies potentielles par la crue de 100 ans et de réduire du même coup les impacts aux 15 bâtiments affectés par la crue centennale (figure 5.3) ou aux 28 bâtiments

inondés par la crue millénaire (figure 5.4). D'ailleurs, sur le site 2, le risque croît rapidement entre les crues de 20 et 100 ans.

Les solutions envisageables pour réduire les impacts au site 2 sont donc une protection individuelle des bâtiments ou une intervention à plus grande échelle agissant à la fois sur les sites 2 et 3.

5.4.2 Site 3

5.4.2.1 *Mécanismes d'inondation*

Le site 3 se situe également dans la ville de Huntingdon, immédiatement en aval du site 2, et s'étend jusqu'au barrage (voir figure 5.1). Le risque sur le site 3 augmente rapidement jusqu'à la crue de période de retour de 20 ans (figure 3.6), mais croît de façon moins importante pour les crues de 20 à 100 ans (figure 3.7), après quoi il demeure presque constant.

La densité de bâtiments sur ce site est forte. La valeur du risque est élevée, soit environ 24 000 \$/an pour la crue de 20 ans. Les résultats des simulations, représentés aux figures 5.5 à 5.7, montrent que dès la crue de 3 ans, la rivière commence à sortir de son lit, et que pour la crue de 20 ans déjà 33 bâtiments sont inondés. Avec l'accroissement des débits, le nombre de propriétés touchées augmente rapidement, car la zone inondée empiète progressivement sur la ville. La topographie de la ville, relativement plane, contribue à cette progression rapide de l'eau sur le territoire habité.

Tout comme au site 2, les simulations hydrauliques ont tenu compte du fait qu'une portion du débit s'écoulant dans la rivière Châteauguay semble contourner la ville en empruntant la décharge Schyler, réduisant ainsi la cote

atteinte par le plan d'eau dans le cours d'eau principal. D'ailleurs, au passage de la crue du 30 mars 1998, d'une récurrence de 1000 ans, il semblerait que les dommages à Huntingdon équivalaient à ceux laissés par certaines crues des dernières années. La dérivation d'une partie du débit par la décharge Schyler et possiblement aussi par la rivière aux Outardes (voir figure 5.1), à partir d'un grand lac formé par la crue, à trois kilomètres en amont de Huntingdon, ainsi qu'une forte rétention exercée par les zones rurales largement inondées plus en amont peuvent expliquer la faible différence du niveau du plan d'eau à Huntingdon entre les crues moyennes et majeures.

Le transfert des eaux vers le bassin de la rivière aux Outardes n'a pas été considéré lors des simulations hydrauliques, étant donné le manque de précision sur la topographie du secteur où ce transfert pourrait s'effectuer. Les

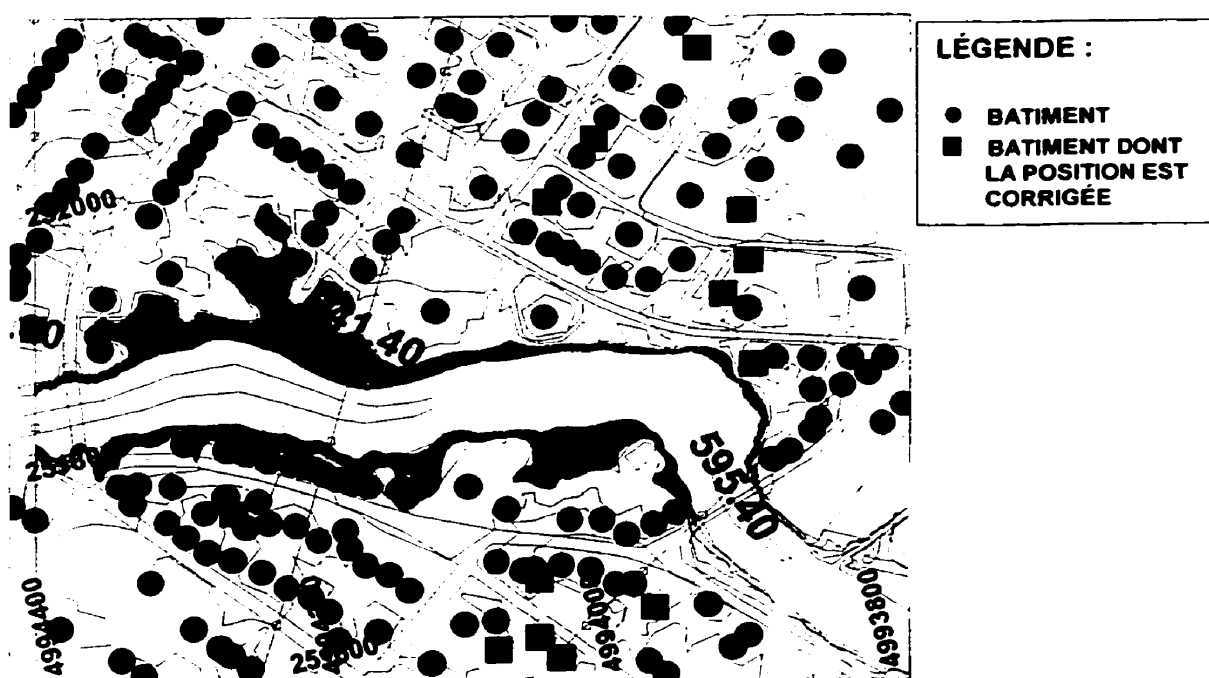


Figure 5.5 : Inondation par la crue de 3 ans au site 3

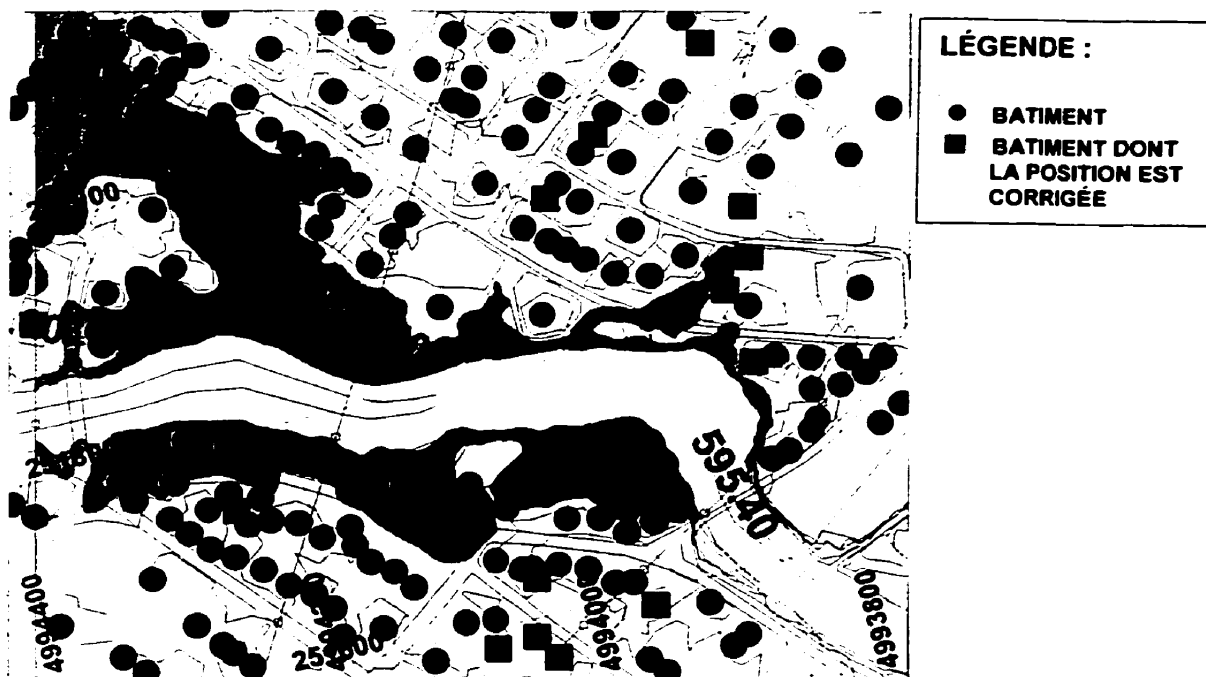


Figure 5.6 : Inondation par la crue de 20 ans au site 3

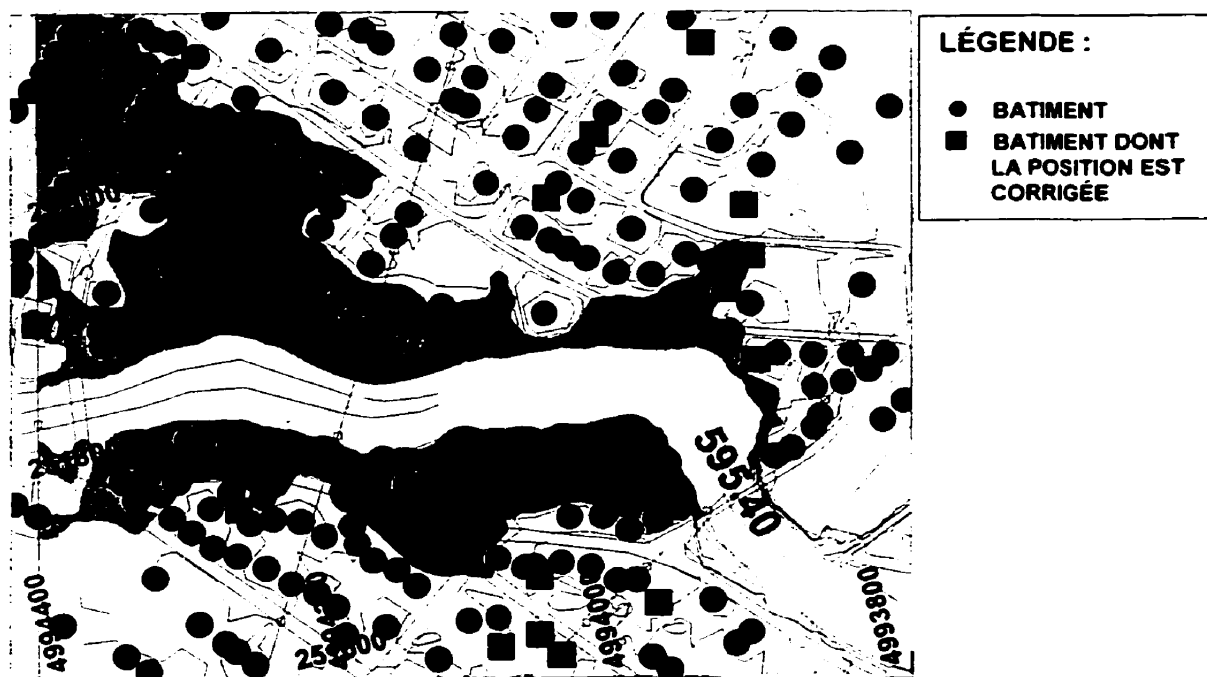


Figure 5.7 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 3

cartes topographiques existantes montrent des courbes de niveau équidistantes de 10 mètres, la précision est insuffisante pour estimer à quelle cote les eaux de la rivière Châteauguay commencent à traverser vers la rivière aux Outardes, et sur quelle largeur le déversement s'opère. Les eaux qui contourneraient la ville de Huntingdon par la rivière aux Outardes seraient retenues dans la zone rurale inondée du bassin de la rivière aux Outardes, pour ensuite être déversées juste en amont de Ormstown.

Malgré la difficulté de simuler fidèlement les crues majeures de la rivière Châteauguay aux environs de Huntingdon, la courbe de risque du site 3 à la figure 3.6 confirme l'intérêt de réduire les impacts des crues dont la fréquence d'occurrence est inférieure à 20 ans. Les dommages pouvant être occasionnés par les crues majeures ne contribuent pas de façon aussi importante à augmenter le risque.

5.4.2.2 *Interventions proposées*

Deux approches sont envisageables pour la protection du site 3. La première est de diminuer la cote maximale atteinte par le plan d'eau lors des crues afin de le maintenir à un niveau auquel il ne cause que très peu ou aucun dommage, par exemple la cote atteinte par la crue de 3 ans. La seconde est de protéger le site contre la montée des eaux en l'isolant. La combinaison de ces deux alternatives est aussi possible.

Dans le cas du site 3, l'emploi de solutions individuelles peut être difficilement justifiable car un grand nombre de bâtiments sont affectés par les crues. La recherche d'une solution collective serait plus rentable et plus appropriée. Toutefois il peut être nécessaire de traiter quelques bâtiments de façon isolée, en plus d'une solution étendue.

Parmi les interventions envisageables, il existe la possibilité de modifier la relation débit / niveau au barrage de Huntingdon. Cette solution permettrait de contrôler l'élévation initiale du plan d'eau et sa montée en fonction du débit. Cette intervention nécessiterait des travaux ponctuels, sur le seuil et l'évacuateur. Étant donné la relativement faible étendue des travaux à réaliser, qui se limiteraient à la modification des ouvrages existant et ne nécessiteraient pas d'acquisition de terrain, l'intervention aurait des chances d'être rentable sur le plan économique. Il faudrait cependant tenir compte des bouleversements possibles du milieu naturel.

Une autre solution possible viserait à diminuer le débit du tronçon de rivière traversant le site en déviant les eaux. Lors des simulations effectuées, il a été considéré que les eaux contournaient la ville d'Huntingdon par la décharge Schyler lorsque le niveau en amont de la ville atteignait la cote de 49,44 mètres. Cette cote correspond au débit de la crue de 20 ans. Le détournement des eaux vers la décharge Schyler lors des crues de 3 à 20 ans permettrait de réduire le débit et donc la cote de la rivière Châteauguay pour ces crues. Il suffirait d'abaisser le niveau du terrain où s'effectue le déversement des eaux.

Le laminage de la crue traversant le site 3 pourrait également être opéré par des ouvrages de rétention qui seraient construits en amont de la ville. De façon naturelle, l'inondation des terres agricoles de Hinchinbrooke effectue une rétention lors des fortes crues. On pourrait donc tenter de forcer cette rétention dès le passage de la crue de 3 ans (la crue de 3 ans touche seulement 3 bâtiments). Mais cette rétention se traduirait par l'inondation plus rapide des routes et des fermes situées en amont d'Huntingdon, le territoire étant occupé. La réduction du risque au site 3 par l'inondation du territoire rural situé en amont serait difficilement justifiable, surtout auprès de la population occupant la zone

rurale. La topographie et l'occupation du territoire ne permettent donc pas une utilisation efficace de ce type de solution.

La construction de murs et de digues permettant de contenir les crues dans le lit de la rivière en amont du barrage dans la ville de Huntingdon est une autre solution envisageable. Le site 3 contient un tronçon de rivière d'une longueur de 0,6 km, ce qui représente une distance relativement courte à aménager. De plus, la rétention opérée de façon naturelle en amont lors des plus fortes crues permet de croire que la hauteur des ouvrages nécessaires pour contenir toutes les crues restera raisonnable. Les bâtiments étant construits très près des berges, particulièrement sur la rive gauche, il ne reste à certains endroits que peu d'espace pour y installer les structures de protection. L'occupation du territoire impose donc l'utilisation de murs de béton sur la totalité de la longueur de chaque berge du site, les digues nécessitant beaucoup d'espace. Ces contraintes d'espace auraient donc pour effet d'augmenter les coûts de ce type d'intervention, l'acquisition de terrain et la construction de murs de bétons étant coûteuses. Du point de vue esthétique et environnemental, les impacts négatifs pourraient également être importants. Cependant cette méthode pourrait s'avérer très efficace pour éliminer le risque inacceptable.

En résumé, les méthodes de réduction des dommages les plus appropriées au site 3 seraient la modification du seuil du barrage à Huntingdon, la déviation des eaux par la décharge Schyler ou la construction de murs de protection. De plus, il faudrait étudier les impacts de ces modifications sur le risque au site 2.

5.4.3 Site 5

5.4.3.1 Mécanismes d'inondation

Le site 5 couvre les abords de la rivière Châteauguay juste en amont du site de l'ancien barrage de la ville de Ormstown (voir figure 5.8). Cette limite aval du site constitue une section de contrôle. La courbe du risque cumulé en fonction de la période de retour du site 5 (figure 3.7) augmente constamment pour des crues d'amplitude supérieure à la crue de 10 ans. Les crues de 2, 3 jusqu'à 10 ans ne causent aucuns dommages aux bâtiments sur le site délimité.

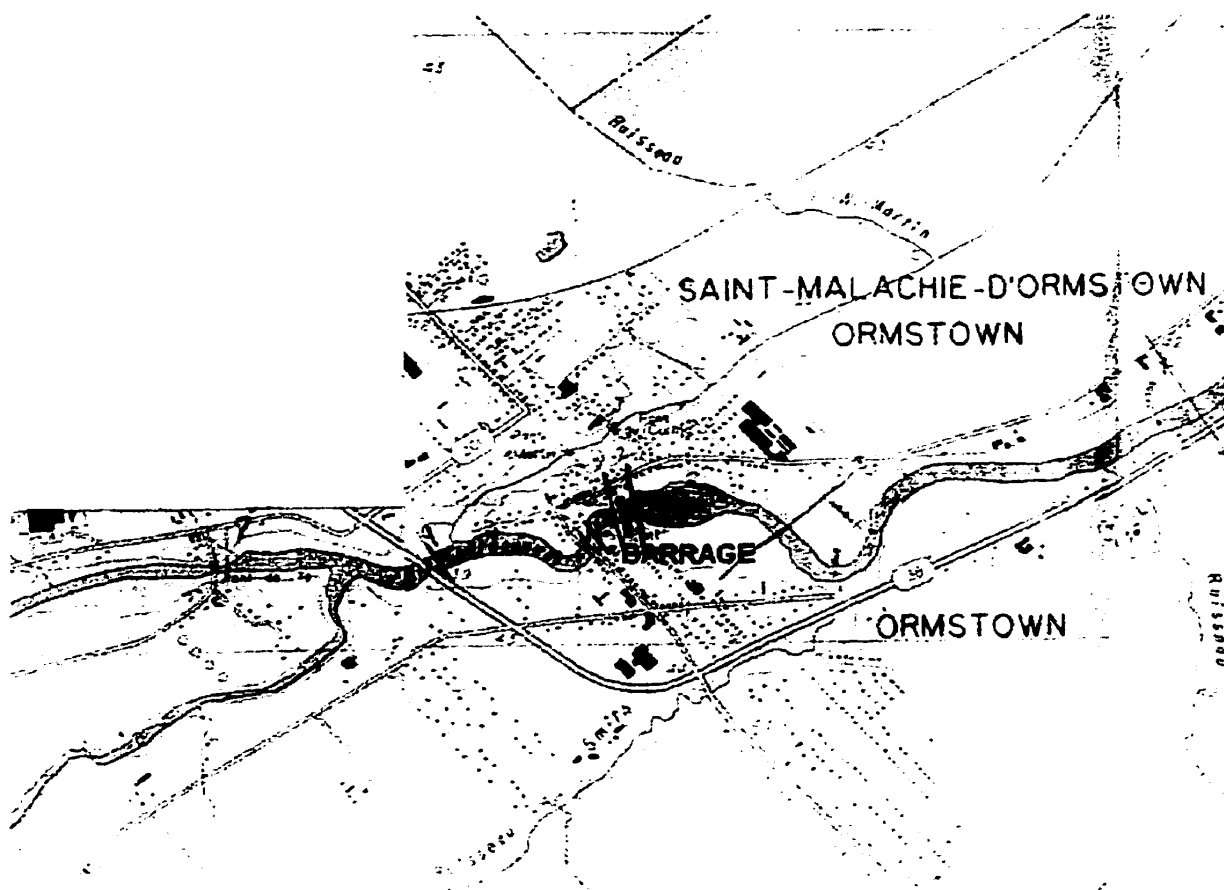


Figure 5.8 : Plan de la région de la ville d'Ormstown

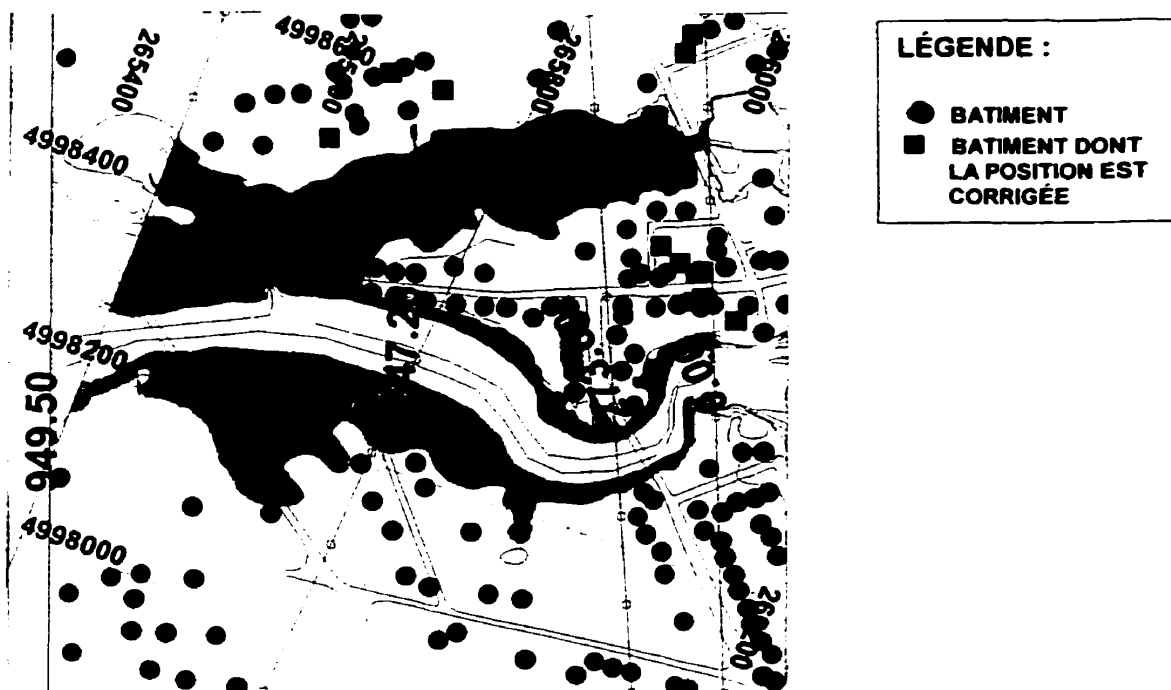


Figure 5.10 : Inondation par la crue de 100 ans au site 5

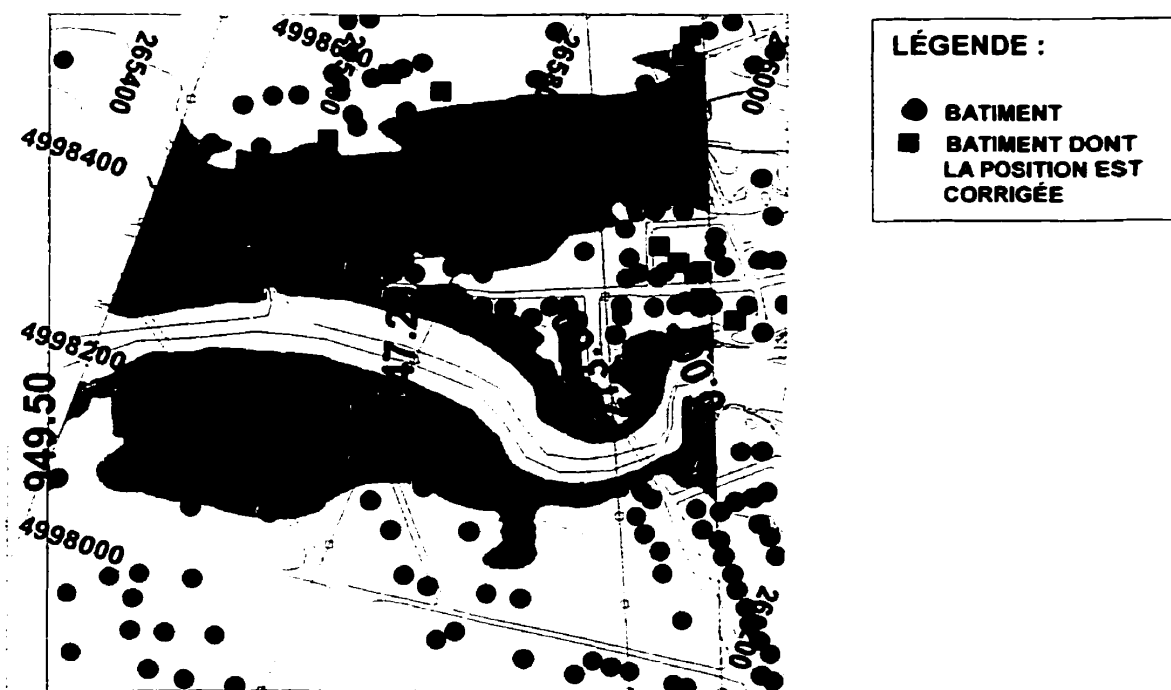


Figure 5.11 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 5

5.4.3.2 *Interventions proposées*

Des simulations du passage de la crue de 20 ans au site 5 il résulte que seulement 1 bâtiment a été inondé (figure 5.9), et que la profondeur de submersion est inférieure à 1 mètre.

Le risque étant plutôt faible, des travaux coûteux seraient difficilement justifiables sur le plan économique. Une solution envisageable est le déplacement ou l'imperméabilisation du bâtiment inondé par la crue de 20 ans. Mais le déplacement d'une maison peut tout de même demander un investissement important. C'est pourquoi il serait intéressant de considérer d'autres solutions dont le coût est du même ordre de grandeur, mais dont l'action s'étend à l'ensemble du site. Ainsi l'impact des crues millénaires, touchant 22 maisons, pourrait également être diminué.

Afin de réduire le niveau d'eau au site 5, une intervention possible est l'amélioration de la capacité hydraulique du cours d'eau juste en amont de l'ancien barrage de Ormstown. À cet endroit, le lit principal de la rivière Châteauguay bifurque et passe d'environ 60 mètres de largeur à seulement 25 mètres. En éliminant la pointe sur la rive droite juste en amont de l'ancien barrage, le tracé du cours d'eau se trouverait plus droit et la section en serait élargie. Le terrain visé par les modifications est inoccupé. Cependant des vitesses d'écoulement plus élevées sont susceptibles de provoquer de l'érosion; un renforcement des berges pourrait s'avérer nécessaire.

Un autre moyen envisageable est la modification de la relation débit / niveau par une modification de la section de contrôle, soit le site de l'ancien barrage. Le seuil ayant disparu, cette alternative semble plus difficilement réalisable. Il faudrait donc élargir la section de contrôle, mais la présence d'un bâtiment sur

la rive gauche nécessiterait alors d'élargir par la rive droite, ce qui équivaut à la solution présentée au paragraphe précédent. Par contre, l'élimination des blocs de bétons situés près de chaque rive à la hauteur de l'ancien barrage pourrait permettre d'améliorer la capacité hydraulique de la section de contrôle.

En résumé, les interventions possibles impliqueraient des travaux majeurs et des investissements relativement importants pour éliminer le risque qui provient d'un seul bâtiment situé dans la plaine de 20 ans. Étant donné que l'on ne dispose que de 439 \$/an pour se prémunir des impacts de la crue de 20 ans, il est possible de conclure que la solution individuelle soit plus rentable.

5.4.4 Site 8

5.4.4.1 *Mécanismes d'inondation*

Le site 8, situé à Saint-Paul-de-Châteauguay, est vulnérable uniquement aux crues majeures. Les crues de 20 et 100 ans (figures 5.12 et 5.13) affectent quelques bâtiments (de 1 à 3) mais causent de faibles dommages. La simulation du passage de la crue de 1000 ans (figure 5.14) estime des pertes plus importantes et le nombre de bâtiments touchés fait un bond à 19. Malgré les dommages causés, le risque ne croît que modérément, étant donnée la faible probabilité d'occurrence de cette crue. Les niveaux d'eau des fortes crues simulées n'ont pas été validés, mais malgré l'incertitude les résultats confirment que le risque global au site 8 reste plutôt bas.

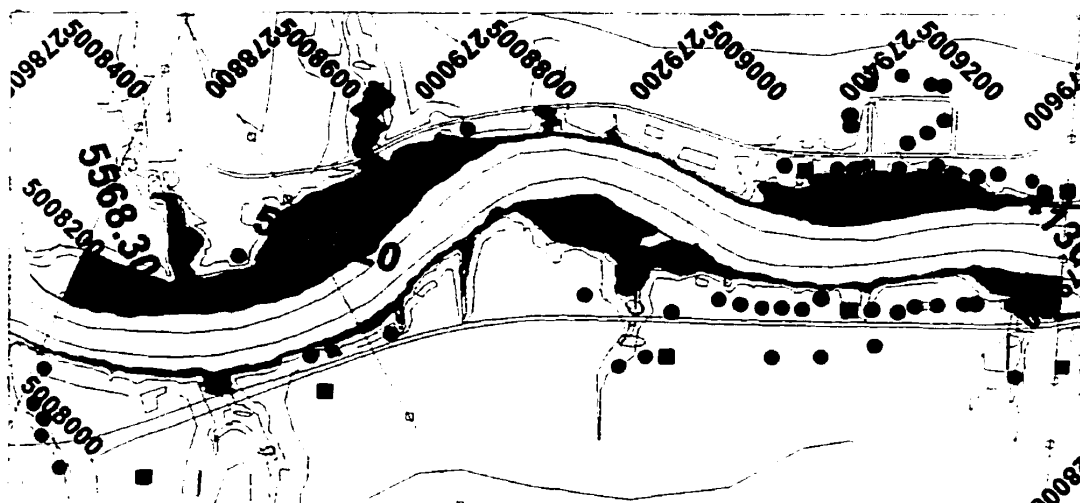


Figure 5.12 : Inondation par la crue de 20 ans au site 8

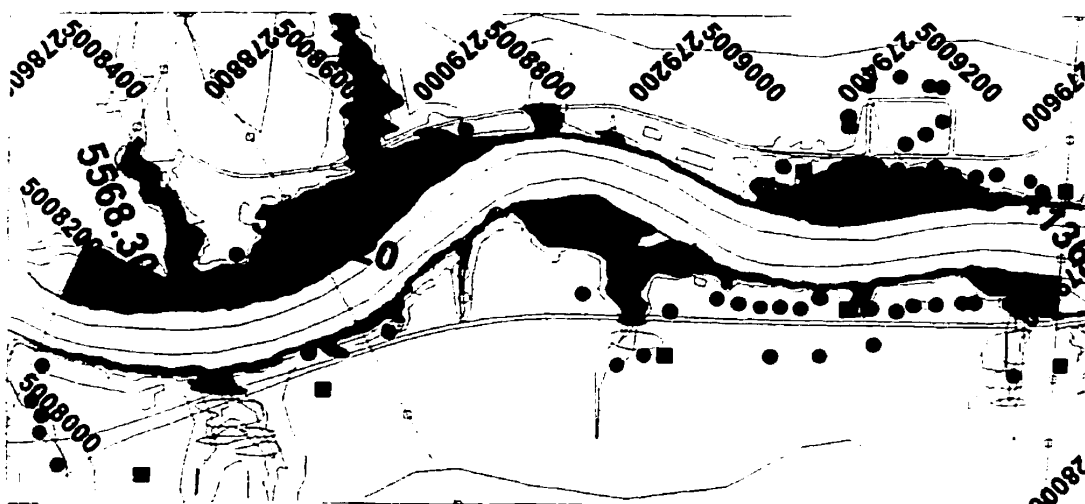


Figure 5.13 : Inondation par la crue de 100 ans au site 8

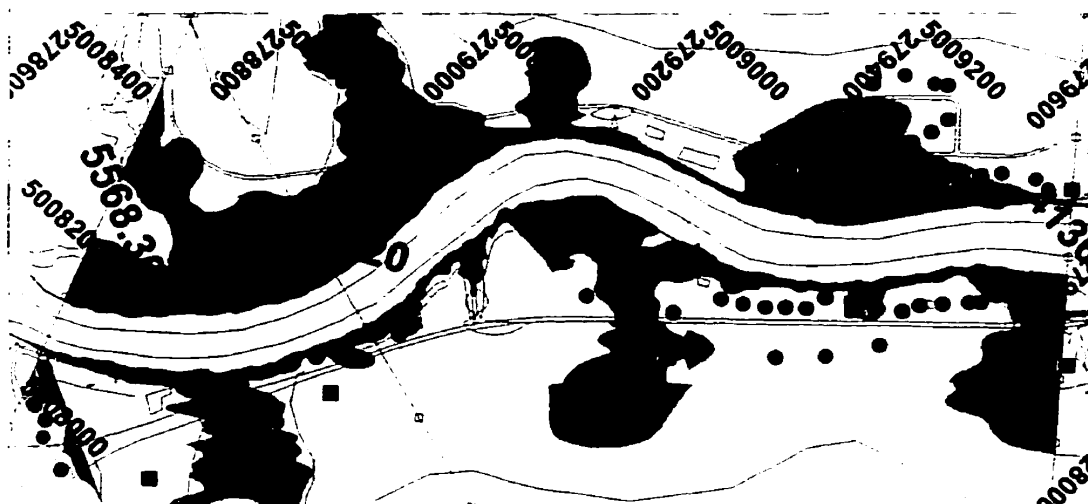


Figure 5.14 : Inondation par la crue de 1000 ans au site 8

5.4.4.2 Interventions proposées

Un seul bâtiment est affecté par la crue de 20 ans au site 8. En tenant compte du fait que le site 8 est situé en zone rurale, avec une faible densité de population, il semble que la meilleure approche serait la protection du bâtiment de façon individuelle.

5.5 Simulation des interventions et évaluation des bénéfices

5.5.1 Synthèse des interventions à simuler

En résumé, les modifications devant être simulées sont les suivantes :

- au site 3 :
 - modifier le seuil du barrage de Huntingdon;
 - dériver un débit supérieur par la décharge Schyler;
 - construire des murs de protection;
- au site 2 :
 - vérifier l'effet des modifications apportées au site 3;
 - protéger individuellement les bâtiments;
- au site 5 :
 - protéger individuellement les bâtiments;
- au site 8 :
 - protéger individuellement les bâtiments.

5.5.2 Dérivation du débit par la décharge Schyler

Une méthode alternative pour réduire le risque aux sites 2 et 3 consiste à dériver une partie du débit de la rivière Châteauguay traversant Huntingdon et ainsi contrôler l'élévation du plan d'eau. Lors des crues, une portion du débit de la rivière est dérivée naturellement vers la décharge Schyler. Il a été estimé que cette dérivation commence à s'opérer lorsque la cote du plan d'eau atteint 49,44 mètres juste en amont du site 2, soit au passage de la crue de 20 ans. Afin de réduire le risque généré par les crues à plus forte récurrence, il serait intéressant d'acheminer une partie du débit vers cette décharge en abaissant le niveau du terrain où s'effectue le déversement. La cote du terrain agissant comme seuil de déversement a été abaissée à 48,5 mètres sur une largeur de 200 mètres. Cette modification du terrain respecte la topographie du terrain. Le seuil étant fixé à cette cote, la dérivation débiterait au passage de la crue de 2 ans. Cependant il est difficile d'établir le débit maximum pouvant être dérivé par la décharge Schyler. Des ponts et des sections étroites en limitent la

capacité hydraulique. Conséquemment, la dérivation d'un trop grand débit est susceptible de causer des dommages supplémentaires aux abords de la décharge. Les dommages et le risque évalués aux sites 2 et 3, suite à la simulation de ces modifications, sont présentés au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Dommages et risque après dérivation par la décharge Schyler

Site	T (ans)	Dommages (\$)	Risque (\$/an)	Risque cumulé (\$/an)	Pertes de vies potentielles	Bâtiments inondés
2	2	360	61	61	0	1
	3	360	83	144	0	1
	10	360	18	162	0	1
	20	360	14	176	0	1
	100	360	3	180	0	1
	1000	360	0	180	2	1
	10000	164670	16	196	2	7
3	2	0	0	0	0	0
	3	3710	853	853	0	1
	10	29720	1486	2339	0	6
	20	86690	3468	5807	8	18
	100	171920	1547	7354	8	28
	1000	181550	163	7518	24	30
	10000	310189	31	7549	39	39

5.5.3 Modification du seuil du barrage de Huntingdon

Les impacts aux sites 2 et 3 peuvent aussi être limités en modifiant la relation débit / niveau du barrage situé immédiatement en aval. Divers scénarios de modifications du barrage ont été étudiés afin de choisir celui qui réduirait au maximum le risque des crues jusqu'à 20 ans, tout en limitant les impacts négatifs générés et les investissements requis. Les modifications ont porté sur le niveau du seuil et l'amélioration du coefficient de débit. L'action de l'évacuateur de crues n'a pas été simulée, mais seulement considérée en augmentant la largeur du seuil.

Une solution efficace consiste à reconstruire le seuil à 0,5 mètre plus bas, avec un déversoir permettant d'obtenir un coefficient de débit maximal. La baisse du niveau du seuil est fixée à 0,5 mètre afin de limiter les impacts négatifs sur le bief amont. Les dommages potentiels et le risque calculés pour les sites 2 et 3 en tenant compte de la modification du seuil se trouvent au tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Dommages et risque après la modification du barrage

Site	T (ans)	Dommages (\$)	Risque (\$/an)	Risque cumulé (\$/an)	Pertes de vies potentielles	Bâtiments Inondés
2	2	0	0	0	0	0
	3	360	83	83	0	1
	10	360	18	101	0	1
	20	360	14	115	0	1
	100	21870	197	312	2	4
	1000	245920	221	533	2	20
	10000	626320	63	596	11	40
3	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	10	3710	186	186	0	1
	20	11370	455	640	2	2
	100	44120	397	1037	4	8
	1000	197009	177	1215	19	23
	10000	596982	60	1274	50	41

5.5.4 Construction de murs au site 3

Une méthode efficace pour éliminer complètement le risque au site 3 est la construction de murs le long des berges de la Châteauguay. Le mur doit cependant être construit suffisamment haut pour minimiser les risques de submersion. L'ajout de murs est simulé dans DAMBRK en limitant la largeur de la section d'écoulement à l'espacement des murs d'une rive à l'autre. Afin de limiter la hauteur du mur à construire et limiter les impacts visuels, il a été choisi de construire le mur en moyenne à partir de la cote 48,0.

Avec l'installation de ce mur, le risque d'inondation par débordement de la Châteauguay est pratiquement éliminé au site 3. Cependant le risque n'est pas diminué au site 2. La présence de ces murs n'a pas d'influence notable sur le niveau d'eau atteint au site 2. Le risque résiduel suite à la construction des murs est considéré comme nul au site 3 et n'ayant pas changé au site 2. La construction de murs sur 1,2 km de rive est probablement la solution la plus onéreuse parmi celles étudiées.

5.5.5 Efficacité des interventions à Huntingdon

L'efficacité des interventions proposées afin de réduire le risque sera étudiée conjointement pour les sites 2 et 3.

Le tableau 5.4, résumant les impacts des interventions à Huntingdon, permet de comparer l'efficacité des différentes interventions simulées aux sites 2 et 3 et d'identifier la plus adéquate, en se basant sur les critères applicables définis à la sous-section 5.2.3.

Selon les résultats combinés pour les sites 2 et 3, le risque non acceptable est réduit avec la même efficacité par la construction de murs et par la modification du seuil. Les économies réalisées sur 20 ans sont de l'ordre de 300 000 \$/an pour la modification du seuil et la construction de murs. La dérivation par la décharge Schyler est moins efficace pour la réduction du risque, avec des économies de 232 600 \$.

La réduction du nombre de pertes de vies potentielles est plus importante par la construction de murs, mais tout de même pour les deux autres types d'interventions, elle est assez proche.

Tableau 5.4 : Impacts des interventions à Huntingdon

	Risque non acceptable (\$/an)		Économies annuelles (\$)	Économies sur 20 ans (\$ 1996)	Pertes de vies potentielles crue de 100 ans	
	Avant	Après			Avant	Après
Dérivation par la décharge						
Site 2	654	176	478	5957	2	0
Site 3	23 993	5807	18 186	226 638	50	8
Total 2 et 3	24 647	5983	18 664	232 695	52	8
Modification du seuil						
Site 2	654	115	539	6717	2	2
Site 3	23 993	640	23 353	291 030	50	4
Total 2 et 3	24 647	755	23 892	297 747	52	6
Construction de murs site 3						
Site 2	654	654	0	8150	2	2
Site 3	23 993	0	23 993	299 006	50	0
Total 2 et 3	24 647	654	23 993	307 156	52	2

Sur le plan économique, un projet de reconstruction du seuil du barrage pourrait être plus rentable comparativement à la construction de murs, malgré des économies du même ordre de grandeur, car les investissements requis seraient moins importants.

Malgré la modification du seuil du barrage à Huntingdon, il reste un risque d'inondation résiduel dans la plaine inondable aux 20 ans de 115 \$/an au site 2 et de 640 \$/an au site 3. Pour protéger tous les bâtiments, il aurait fallu des modifications beaucoup plus importantes.

Afin d'éliminer complètement le risque économique non acceptable, et aussi les pertes de vies potentielles, il faudrait intervenir directement sur les bâtiments en les protégeant de façon individuelle. Cette protection peut être apportée de différentes manières, soit en les imperméabilisant, soit en haussant les bâtiments ou encore en les déplaçant. Le mode de protection dépendra entre autres du niveau de submersion atteint. Sur les sites 2 et 3, trois bâtiments restent à protéger dans la plaine inondable par la crue de 20 ans.

Finalement, si un plus grand poids est accordé aux pertes de vies potentielles, la construction de murs au site 3 et la protection de bâtiments de façon individuelle seraient plus efficace.

5.5.6 Protection des bâtiments aux sites 5 et 8

Le risque économique non acceptable aux sites 5 et 8 peut être éliminé en protégeant les bâtiments individuellement. Sur chacun de ces deux sites, un seul bâtiment est affecté par la crue de 20 ans.

Les interventions visant à éliminer le risque économique non acceptable devraient également permettre d'éliminer le risque de pertes de vie par la crue de 100 ans, qui est de deux personnes sur chaque site. Sur un horizon économique de 20 ans, on dispose de 5471 \$ au site 5 et de 1919 \$ au site 8 pour que le projet soit rentable.

5.6 *Impacts négatifs potentiels*

Toutes modifications du lit du cours d'eau, des sections de contrôle ou des apports sont susceptibles d'avoir un impact sur l'amplitude et la vitesse de

propagation des crues. Les niveaux maximums du plan d'eau, les vitesses d'écoulement et la durée de l'inondation pour un débit de crue donné peuvent être augmentés à certains endroits et diminués à d'autres.

Ainsi chaque intervention sur la rivière en vue de réduire les risques reliés aux inondations sur un site peut générer des impacts négatifs en d'autres endroits. Il devient donc nécessaire, lors de la mise sur pied de tels projets, de considérer l'ensemble de la rivière.

CHAPITRE 6

IMPACTS D'UN COUVERT DE GLACE

6.1 *Effet d'un couvert de glace*

La présence d'un couvert de glace sur une rivière pendant la crue printanière a pour effet d'offrir une résistance supplémentaire à l'écoulement et est ainsi susceptible de faire augmenter la cote du plan d'eau par rapport à la cote atteinte pour l'écoulement du même débit en eau libre. Donc une intervention pour détruire ce couvert de glace peut avoir pour effet de réduire les dommages d'inondation. Cependant on ne connaît pas l'ordre de grandeur des impacts de la présence d'un couvert de glace. Afin d'établir s'il serait avantageux d'investir dans les interventions pour détruire le couvert de glace, il faut en estimer les bénéfices. L'estimation de ces bénéfices requiert la simulation des écoulements en présence de glace et l'estimation des dommages d'inondation avec et sans couvert de glace.

Le logiciel DAMBRK utilisé pour les simulations hydrauliques n'offre pas d'option permettant de simuler des écoulements sous un couvert de glace. Une façon de simuler le couvert de glace à travers les paramètres d'entrée de DAMBRK doit être élaborée. L'effet des glaces sera pris en compte en modifiant le coefficient de résistance, soit le n de Manning.

6.2 *Équation modifiant le coefficient de résistance*

La résistance d'un couvert de glace pourrait être simulée en modifiant la valeur du n de Manning. La présence de ce couvert de glace peut être traduite par l'augmentation du périmètre mouillé, car une résistance à l'écoulement s'opère

à la surface du cours d'eau, de la même façon qu'elle s'opère sur les parois du lit de la rivière.

L'équation permettant d'évaluer le coefficient n de Manning modifié a été développée à partir du fait que le débit s'écoulant en présence de glace est égal au débit s'écoulant en eau libre. En utilisant l'équation de Manning on obtient :

$$Q = Q'$$

$$\frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{n' \cdot P'^{2/3}} = \frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{n \cdot P^{2/3}}$$

où : A est la section d'écoulement
 S est la pente de la ligne d'énergie
 n est le coefficient de Manning
 P est le périmètre mouillé
 « ' » indique la présence de glace

En posant que $A' = A$ et $S' = S$, on obtient l'équation du n de Manning tenant compte de la présence de glace :

$$n' = n \cdot \frac{P'^{2/3}}{P^{2/3}}$$

Ainsi, pour chaque tronçon de rivière où la glace modifie le périmètre mouillé, cette équation permet de calculer une valeur de n modifiée. Le n' est évalué par tranches horizontales, auxquelles correspond un périmètre mouillé défini.

6.3 Hypothèses et sources d'erreurs

L'équation proposée à la section 2 est basée sur un certain nombre d'hypothèses. D'abord le coefficient de résistance offert par le dessous du couvert de glace est inconnu. Selon l'état de ce couvert de glace, il peut varier. Par défaut, il est posé équivalent au coefficient n de Manning moyen du lit de la rivière. L'évaluation par tranche du périmètre mouillé, selon la hauteur du plan

d'eau, amène aussi une erreur pour les hauteurs d'eau intermédiaires. Les coefficients de Manning utilisés pour simuler les écoulements en eau libre ne reflètent pas exactement la rugosité du lit de la rivière car ils ont servi de paramètres de calibration. Donc à certaines sections leur valeur dépasse les valeurs normalement utilisées, et ces valeurs élevées sont utilisées pour calculer la résistance offerte par le couvert de glace.

Ces hypothèses sont susceptibles d'être à la source d'erreurs importantes dans les résultats des simulations hydrauliques. C'est pourquoi cette méthode ne permet qu'une estimation de l'ordre de grandeur des impacts d'un couvert de glace.

Finalement, les paramètres les plus difficilement prévisibles demeurent l'occurrence, la position et la longueur d'un couvert de glace lors de la crue.

6.4 Couverts de glace sur la rivière Châteauguay

Il semble que très peu de données soient disponibles sur les embâcles et les accumulations de glace sur la rivière Châteauguay. Les seules données recueillies proviennent de la crue printanière de 1998.

La crue de 1998 est survenue à la fin du mois de mars, suite à des températures très élevées pendant quelques jours consécutifs. Des images filmées le 29 mars 1998, par M. Daoust de la MRC du Haut-St-Laurent, montrent que la rivière coulait en eau libre en amont de Ormstown. Les écoulements semblaient d'ailleurs beaucoup plus rapides dans l'amont du bassin versant, et les glaces avaient été emportées. La première accumulation de glace observée sur la rivière se situait juste en amont du pont de la route 138

à Ormstown, sur un court tronçon. La première accumulation majeure de glace se trouvait à Howick. Entre Ormstown et Howick, des couverts de glace couvraient la rivière sur de courts tronçons dans les méandres plus accentués et au niveau des ponts.

La probabilité de l'occurrence d'inondation en présence de glace peut modifier le niveau de risque d'inondation, mais cette probabilité n'est pas connue.

L'étude du risque d'inondation sur la rivière Châteauguay a été réalisée en se basant sur courbe de répartition de fréquence des crues calculée avec les débits maximums annuels. La présence de glace est possible seulement durant l'hiver et lors de la crue printanière. Les informations recueillies laissent croire qu'une grande partie des crues importantes de la rivière Châteauguay surviennent lors de la fonte des neiges. Il est possible de vérifier cette information en observant les dates et l'amplitude des débits journaliers maximums annuels, présentés au tableau 6.1. Les débits ont été observés aux stations 030901 et 030905, à Saint-Paul-de-Châteauguay et à Mercier.

Sur des débits maximums mesurés sur 68 années, 14 sont survenus après la crue printanière, ce qui confirme que la plupart des crues (79%) surviennent lors de la fonte printanière. Il y a donc de fortes probabilités que les crues importantes surviennent en présence de glace. Par contre, il n'est pas possible à partir de ces informations de prévoir l'étendue de ce couvert de glace.

Tableau 6.1 : Date des débits journaliers maximums annuels

Année	Date	Débit (m³/s)	Note	Année	Date	Débit (m³/s)	Note
1921	9 mars	572		1956	5 avril	388	
1922	20 mars	767		1957	27-28 février	133	
1923	8 avril	518		1958	1-10 avril	276	
1924	10 avril	292		1959	1-10 avril	345	
1925	16 novembre	200	Pluie	1960	1-10 avril	388	
1926	24 avril	496		1961	17 avril	294	
1927	18 novembre	569	Pluie	1962	8 avril	634	
1928	9 avril	286		1963	1-5 avril	473	
1929	18 avril	320	Pluie	1964	6 mars	362	
1930	8 avril	351		1965	28 novembre	377	Pluie
1931	3 avril	160		1966	25 mars	222	
1932	12 avril	456		1967	3 avril	597	
1933	13 avril	436		1968	22 mars	306	
1934	13 avril	394		1969	11 avril	371	
1935	18 avril	311	Pluie	1970	10 avril	606	
1936	25 mars	419		1971	15 avril	682, 425	
1937	16 mai	306	Pluie	1972	14 avril	510	
1938	23 mars	660		1973	18 mars	428	
1939	15 avril	580		1974	5 avril	756	
1940	19 avril	259	Fonte + pluie	1975	20 avril	450	
1941	1-12 avril	185		1976	22 mars	459	
1942	20 avril	589	Pluie	1977	14 mars	555	
1943	13 mai	479	Pluie	1978	13 avril	602	
1944	28 mars	787		1979	7 mars	309	
1945	19 mai	428	Pluie	1980	10 décembre	194	Pluie
1946	1 mars	126		1981	28 octobre	452	Pluie
1947	21 mai	501	Pluie	1982	1 avril	471	
1948	28 mars	255		1983	15 décembre	408	Pluie
1949	7 avril	450	Fonte + pluie	1984	16 février	277	
1950	1 avril	237		1985	14 mars	364	
1951	-			1986	20 mars	440	
1952	3 avril	382		1987	26 mars	443	
1953	1 avril	268		1988	30 avril	272	Pluie
1954	17 avril	254	Fonte + pluie	1989	29 mars	448	
1955	1 avril	331		1990			

6.5 Simulation d'une inondation avec couvert de glace

Afin d'évaluer les impacts de la présence d'un couvert de glace sur les dommages d'inondation, le site 5 à Ormstown a été retenu. Un couvert de glace a été simulé entre les ponts de la route 138 et de la rue Bridge. Les ponts se situent souvent en zone urbaine, et semblent constituer un obstacle au déplacement des glaces sur la rivière Châteauguay.

Les simulations du niveau de l'eau sur le site et en amont, à l'aide du logiciel DAMBRK et des coefficients de Manning tenant compte de la présence du couvert de glace, montrent une très faible augmentation du niveau de l'eau comparativement au niveau atteint en eau libre. Cette augmentation atteint un maximum juste en amont du couvert de glace, au pont de la route 138, de 6 cm pour les crues de 2 à 20 ans, et de 9 cm pour la crue de 100 ans.

L'impact d'un couvert de glace sur un court tronçon semble donc plutôt faible en ce qui concerne le niveau maximum du plan d'eau. L'effet du couvert de glace sur les niveaux d'eau en amont semble être significatif lorsque le couvert s'étant sur une grande longueur. Les problèmes d'inondations liés aux embâcles seraient donc beaucoup plus importants.

CONCLUSION

L'approche de calcul et d'analyse du risque d'inondation présentée dans ce mémoire se divise en deux étapes principales : l'évaluation des dommages et du risque d'inondation et l'exploitation de ces résultats pour minimiser les impacts des inondations.

L'évaluation des dommages et du risque est réalisée à partir de données déjà compilées et d'outils existants. Les débits correspondants à diverses crues sont calculés par une courbe de distribution de fréquence. Le modèle DAMBRK, un modèle d'écoulement unidimensionnel et non permanent, permet de simuler les niveaux d'eau et les vitesses en fonction du temps et de l'espace lors du passage de chaque crue. Les dommages d'inondations sont évalués et compilés à l'aide du logiciel DOMINO. Ce logiciel permet de constituer un modèle numérique du terrain, d'intégrer les résultats des simulations hydrauliques, d'établir les zones inondées, d'intégrer les rôles d'évaluation et de calculer les conditions d'inondation et les impacts pour chaque unité. Les impacts sont cumulés pour un site et le risque d'inondation est calculé en faisant le produit des dommages et des probabilités des crues associées.

L'analyse du risque d'inondation calculé permet d'identifier l'existence d'un risque considéré inacceptable. Le risque est analysé selon ses différentes composantes, soit les pertes économiques, les pertes de vies potentielles et les dommages indirects. Des critères concernant le risque, devant être établis selon les exigences de la population, servent de base à la prise de décision. Pour chaque site où des interventions sont justifiées par ces critères, des scénarios de minimisation du risque tenant compte des mécanismes d'inondation sont élaborés et ensuite simulés afin d'en mesurer l'efficacité.

Cette démarche a été utilisée pour l'étude de dix sites du bassin de la rivière Châteauguay. La simulation des divers scénarios de minimisation du risque sur ces sites a démontré qu'il était possible de réduire les impacts des inondations par des interventions appropriées. La méthode d'analyse et de minimisation du risque proposée dans ce document et appliquée au cas de la rivière Châteauguay peut s'adapter à l'étude de tout autre cours d'eau, car elle tient compte des conditions hydrologiques et hydrauliques locales.

Étant donné que la rivière Châteauguay a souvent causé des inondations dans le passé, et qu'il s'agit d'un territoire depuis longtemps habité, il existe une bonne quantité d'informations sur le régime du cours d'eau et sur l'historique de ses inondations. La disponibilité de ces informations a facilité l'étude du risque sur la rivière Châteauguay. Par contre, au Québec, les données hydrologiques ne sont généralement disponibles que pour des durées relativement courtes, et ne couvrent qu'un nombre de plus en plus limité de cours d'eau. Il peut s'avérer difficile d'obtenir des données historiques permettant de calibrer adéquatement le modèle hydraulique. Les cartes topographiques à petite échelle ne couvrent que des parcelles de la province, et la précision de la position des unités d'évaluation données par les matrices graphiques n'est pas toujours assurée. Les relations profondeur / dommages (ou facteurs de pondération des impacts) sont également difficiles à établir pour chaque zone d'étude. Les dommages additionnels dus à la présence de glace devraient également être considérés, mais très peu d'information semble disponible à ce sujet. Bref, la fiabilité des résultats obtenus dépend directement de la disponibilité, de la qualité et de la précision des données de base.

Dans cette étude, l'évaluation du risque a permis d'élaborer des scénarios d'interventions visant à minimiser les impacts des inondations. Cependant les outils et les simulateurs utilisés pour l'évaluation du risque pourraient être

exploités de façon beaucoup plus étendue. Deux nouvelles voies sont envisageables, soit l'utilisation de ces outils pour aider au développement optimal à long terme des plaines inondables, et la prévision à court terme et le suivi en temps réel des inondations.

L'ajout d'un simulateur hydrologique permettrait d'étudier les impacts du développement sur le ruissellement. La simulation d'inondations pourrait permettre de connaître les impacts de toute modification du bassin versant sur le niveau de risque et sa répartition. Ainsi il serait possible de mettre sur pied des mesures d'interventions structurelles et non structurelles de minimisation du risque permettant un développement optimal, car elles tiendraient compte des conditions futures. De plus, l'étude de scénarios d'inondation permettrait d'étudier la progression des inondations dans l'espace et dans le temps pour établir des plans de mesures d'urgence.

Le couplage avec un simulateur hydrologique permettrait également de faire des prévisions à court terme. Ainsi le suivi en temps réel des inondations serait possible en mettant sur pied un simulateur utilisant la télédétection, les systèmes d'information géographiques et les prévisions météorologiques. La prévision à court terme des inondations permettrait d'en prévoir la progression, d'identifier les zones qui seront affectées et d'aviser la population concernée. Cette alerte permettrait à la population de prendre toutes les mesures possibles pour réduire les impacts : déplacer et mettre à l'abri certains biens à l'intérieur de la maison, déplacer les véhicules à l'extérieur de la zone qui sera inondée et évacuer les lieux. Les prévisions à court terme sont possibles à condition de pouvoir inclure au simulateur les données sur les conditions hydrologiques actuelles. La télédétection fournirait ces informations en détectant sur le terrain l'étendue du couvert de neige, la présence de glace en rivière et les conditions d'humidité du sol.

RÉFÉRENCES

- APPELBAUM, S.J. (1985). Determination of urban flood damages. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.111, no.3, 269-283.
- ARNELL, N.W. (1986). Average annual damage by flood frequency zone. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.112, no.1, 104-113.
- ARNELL, N.W. (1989). Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.115, no.1, 94-107.
- ASCE (1988). Evaluation Procedure for Hydrologic Safety of Dams. Task Committee on Spillway Design Flood Selection.
- AWADALLAH, A.G., ROUSSELLE, J. et LECONTE, R. (1999). Évolution du risque hydrologique sur la rivière Châteauguay. Revue canadienne de génie civil, vol.26, no.4, 510-523.
- BEARD, L.R. (1997). Estimating flood frequency and average annual damage. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.123, no.2, 84-88.
- BELTAOS, S. (1983). River ice jams : theory, case studies, and applications. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.109, no.10, 1338-1359.

BOUILLON, M.C. (1998). Évolution historique du risque de pertes économiques dus aux inondations sur la rivière Châteauguay. Rapport de projet de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.

BOUILLON, M.C., BRISSETTE, F.P., et MARCHE, C. (1999). Le risque d'inondation et son évolution sur la rivière Châteauguay. Revue canadienne de génie civil, vol.26, no.2, 186-196.

BOYLE, S.J., TSANIS, I.K. et KANAROGLOU, P.S. (1998). Developing geographic information systems for land use impact assessment in flooding conditions. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.124, no.2, 89-98.

CSA (Canadian Standard Association) (1991). Risk Analysis Requirements and Guidelines. CAN/CSA-Q634-91.

CHAUDHRY, M.H. (1993). Open-channel flow. Prentice Hall.

CHOW, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill book company.

DAS, S. et LEE, R. (1988). A nontraditional methodology for flood stage-damage calculations. Water Resources Bulletin, vol.24, no.6, 1263-1272.

DESMEULES, J. et GÉLINAS, J.P. (1981). Caractéristiques physiques et démographiques, eaux de surface, bassin versant de la rivière Châteauguay. Édité par le gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, dans la série Programme de connaissances intégrées.

EL-JABI, N. et ROUSSELLE, J. (1987). A flood damage model for flood plain studies. Water Resources Bulletin, vol.23, no.2, 179-187.

FREAD, D.L. (1984). Dambrk – The NWS dam-break flood forecasting model. Office of hydrology, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, USA.

GAGNON, J., QUACH, T.T., MARCHE, C., et LESSARD, G. (1998). Computerised evaluation of flood impact. 10th CSDA/CANCOLD Dam Safety Conference, Halifax, Canada.

GRIGG, N.S. et HELWEG, O.J. (1975). State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas. Water Resources Bulletin, vol.11, no.2, 379-390.

JAMES, L.D. et HALL, B. (1986). Risk information for floodplain management. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 112, no.4, 485-499.

JOHNSON, W.K. (1985). Significance of location in computing flood damage. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 111, no.1, 65-81.

LAPOINTE, D. (1980). Eaux de surface – Bassin versant de la rivière Châteauguay. Édité par le gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, dans la série Programme de connaissances intégrées.

LINSLEY, R.K., FRANZINI, J.B., FREYBERG, D.L. et TCHOBANOGLIOUS, G. (1992). Water-Resources Engineering. McGraw-Hill, New York.

MAIDMENT, D.R. (1992). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill.

MARCHE, C. et McNEIL, E. (1993). Une méthode d'estimation des dommages et impacts des inondations et son application au secteur Shawinigan / La Gabelle. Rapport soumis par le Centre de développement technologique, École Polytechnique, Montréal.

McBEAN, E.A., GORRIE, J., FORTIN, M., DING, J., et MOULTON, R. (1988a). Flood depth-damage curves by interview survey. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 114, no.6, November, 1988, 613-634.

McBEAN, E.A., GORRIE, J., FORTIN, M., DING, J., et MOULTON, R. (1988b). Adjustment Factors for Flood Damage Curves. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 114, no.6, 1988, 635-646.

MICHEL, B. (1986). Course on river ice engineering. École Polytechnique de Montréal.

OUELLETTE, P., LEBLANC, D., EL-JABI, N. et ROUSSELLE, J. (1988). Cost-benefit analysis of flood-plain zoning. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol.114, no.3, 326-334.

ROUSSELLE, J., WATT, W.E., LATHEM, K.W., NELL, C.R. et RICHARDS, T.L. (1990). Hydrologie des crues au Canada : Guide de planification et de conception. Conseil national de recherches Canada et Comité associé d'hydrologie.

SHEN, H.T. et YAPA, P.D. (1986). Flow resistance of river ice cover. Journal of Hydraulic Engineering, vol.112, no.2, p.142-156.

SOBEK TECHNOLOGIES Inc. (1998). DOMINO, guide de l'utilisateur, version 1.5.

THAMPAPILLAI, D.J. et MUSGRAVE, W.F. (1985). Flood Damage Mitigation: A Review of Structural and Nonstructural Measures and Alternative Decision Frameworks. Water Resources Research, vol. 21, no.4, 411-424.

TREMBLAY, M. (1981). Les utilisations de l'eau, étude de la presse écrite – Bassin versant de la rivière Châteauguay. Édité par le gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, dans la série Programme de connaissances intégrées.

YOE, C.E. (1984). Ice-related flood damage estimation. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 110, no.2, 141-152.